



# Universidad de Cuenca

## Facultad de Ingeniería

### Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

---

## Diseño de un dispositivo IoT para la detección de celo en ganado bovino

---

---

*Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero en Electrónica y  
Telecomunicaciones.*

---

#### **Autores :**

Pablo Xavier Briones Romero  
[xpablo.brionesr@hotmail.com](mailto:xpablo.brionesr@hotmail.com)

C.I. 010734180-2

Gustavo Andrés Vivar Ramon  
[gus\\_vr14@hotmail.com](mailto:gus_vr14@hotmail.com)

C.I. 010507129-4

#### **Director :**

Ing. Darwin Fabian Astudillo Salinas, PhD  
[fabian.astudillos@ucuenca.edu.ec](mailto:fabian.astudillos@ucuenca.edu.ec)

C.I. 010390703-6

---

**Cuenca - Ecuador**  
**08 de Noviembre de 2021**





---

## Resumen

En la granja Iruquis de la Universidad de Cuenca, el objetivo fundamental con su ganado, es conseguir un intervalo de tiempo entre gestación que resulte en una producción máxima tanto de crías como de producción de leche. Esto se viene realizando mediante inseminación artificial en el ganado bovino. Con este método se permite prescindir del uso de los toros, que muchas veces son de difícil manejo. Para realizar la inseminación, el bovino debe encontrarse en celo. En función de la calidad con que se ejecuta la técnica de detección de celos, aumenta la eficacia de la inseminación. Para la detección del celo, actualmente se usan métodos de observación continua que no son eficaces, perdiendo así muchas veces el celo en el animal. Por esta razón, existe la necesidad de desarrollar un prototipo que facilite la detección, mediante la adquisición de datos del comportamiento físico de la vaca y que los transmita en tiempo real para disponer de la información oportunamente. Este proyecto busca diseñar y desarrollar un dispositivo IoT que recolecte datos del comportamiento de una vaca, detecte un posible celo, almacene estos datos y los transmita, con un rango de cobertura de 1 Km en línea de vista. Este dispositivo IoT ejecuta el protocolo LoRaWAN en un microcontrolador. El estado de la placa será monitoreado con un sensor de temperatura y humedad. Los datos serán respaldados en una tarjeta de memoria micro SD, para luego ser transmitidos hacia un *Gateway* con su respectiva marca de tiempo, para esto se utilizará un reloj en tiempo real. El dispositivo desarrollado es un circuito PCB de dos caras. Para reducir su tamaño se usó tecnología de montaje superficial. Sus dimensiones son  $60mm \times 40mm$ , encapsulado en un contenedor IP65; el cual será ubicado en un chaleco sobre una vaca.

El *Gateway* estará conectado al transceptor a través de una placa PCB, encapsulado en otro contenedor que cumple con el protocolo IP65 y conectado a una red LAN.

Una vez realizadas las pruebas correspondientes en dos animales de la granja, los resultados fueron exitosos, logrando detectar el celo oportunamente en los dos experimentos.

En conclusión, el diseño y desarrollo del prototipo IoT es un método válido para el estudio de la detección de celo en ganado bovino, cumpliendo de manera satisfactoria los objetivos planteados; dejando una base para continuar con futuros estudios relacionados con el tema del ganado.

**Palabras clave :** Estro. Gateway. Nodo. PCB. LoRa. LoRaWAN







---

## Abstract

This is being done through artificial insemination in cattle. This method makes it possible to dispense with the use of bulls, which are often difficult to handle. In order to perform the insemination, the cattle must be in estrus. Depending on the quality with which the estrus detection technique is performed, the efficiency of the insemination increases. For estrus detection, continuous observation methods are currently used, but they are not effective, thus losing the animal's estrus many times. For this reason, there is a need to develop a prototype that facilitates the detection by acquiring data of the cow's physical behavior and transmitting them in real time in order to have them available in a timely manner.

This project seeks to design and develop an IoT device that collects data from the behavior of a cow, detects a possible estrus, stores this data and transmits it, with a coverage range of 1 km in line of sight. This IoT device runs the LoRaWAN protocol on a microcontroller. The status of the board will be monitored with a temperature and humidity sensor. The data will be backed up on a micro SD memory card, and then transmitted to a *Gateway* with its respective timestamp, for this a real time clock will be used. DevelopmentThe developed device is a two-sided PCB circuit. For estrus detection, continuous observation methods are currently used, but they are not effective, thus losing the animal's estrus many times. For this reason, there is a need to develop a prototype that facilitates the detection by acquiring data of the cow's physical behavior and transmitting them in real time in order to have them available in a timely manner.

This project seeks to design and develop an IoT device that collects data from the behavior of a cow, detects a possible estrus, stores this data and transmits it, with a coverage range of 1 km in line of sight. This IoT device runs the LoRaWAN protocol on a microcontroller. The status of the board will be monitored with a temperature and humidity sensor. The data will be backed up on a micro SD memory card, and then transmitted to a *Gateway* with its respective timestamp, for this a real time clock will be used.

DevelopmentThe developed device is a two-sided PCB circuit. To reduce its size, surface mount technology was used. Its dimensions are  $60mm \times 40mm$ , encapsulated in an IP65 container; which will be placed in a vest on a cow. The *Gateway* will be connected to the transceiver through a PCB board, which will be encapsulated in another container with IP65 technology and connected to a LAN network.

Once the corresponding tests were carried out in two animals of the farm, the results were successful, achieving timely detection of estrus in both experiments.

In conclusion, the design and development of the IoT prototype is a valid method for the study of estrus detection in cattle, satisfactorily fulfilling the objectives set; leaving a basis to continue with future studies related to the subject of cattle.

**Keywords :** Estrus. Gateway. Node. PCB. LoRa. LoRaWAN





---

## Índice general

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Índice general</b>	<b>V</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>IX</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XI</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>XVII</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>XIX</b>
<b>Abreviaciones y acrónimos</b>	<b>XXI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>17</b>
1.1. Identificación del problema . . . . .	17
1.2. Justificación . . . . .	18
1.3. Alcance . . . . .	18
1.4. Objetivos . . . . .	19
1.4.1. Objetivo general . . . . .	19
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	19
<b>2. Marco teórico</b>	<b>21</b>
2.1. Red de sensores inalámbricos . . . . .	21
2.2. LPWAN . . . . .	22
2.3. LoRaWAN . . . . .	23
2.3.1. Mecanismo de activación LoRaWAN . . . . .	23
2.3.2. Seguridad en una red LoRaWAN . . . . .	24
2.4. Protocolos de comunicación . . . . .	25
2.4.1. Comunicación SPI . . . . .	25
2.4.2. Comunicación I2C . . . . .	26
2.4.3. Comunicación UART . . . . .	26
2.5. Componentes principales . . . . .	27
2.5.1. Raspberry pi . . . . .	27
2.5.2. Microcontroladores . . . . .	28



2.5.3. Tranceptores . . . . .	29
<b>3. Estado del Arte</b>	<b>31</b>
<b>4. Diseño e Implementación</b>	<b>35</b>
4.1. Variables a ser monitorizadas en el animal . . . . .	35
4.1.1. Actividad física . . . . .	35
4.1.2. Monta del animal . . . . .	36
4.2. Requerimientos del sistema . . . . .	36
4.3. Descripción de los elementos utilizados . . . . .	37
4.3.1. Transceptor . . . . .	37
4.3.2. Microcontrolador . . . . .	38
4.3.3. Sensores . . . . .	39
4.3.4. Reloj de tiempo real . . . . .	41
4.3.5. Almacenamiento . . . . .	42
4.4. Comunicación entre dispositivos . . . . .	43
4.5. Arquitectura del dispositivo . . . . .	44
4.6. Placa de circuito impreso (PCB) . . . . .	46
4.6.1. Placa de circuito impreso (PCB) para el nodo . . . . .	46
4.6.2. Placa de circuito impreso (PCB) para el Gateway . . . . .	48
4.7. Aplicación del protocolo LoRaWan . . . . .	50
4.7.1. Nodo final LoRa . . . . .	50
4.7.2. LoRa Gateway . . . . .	52
4.7.2.1. Reenviadores de paquetes . . . . .	52
4.7.2.2. ChirpStack . . . . .	53
4.7.2.3. Puente de puerta de enlace ChirpStack . . . . .	53
4.7.2.4. Servidor de red ChirpStack . . . . .	53
4.7.2.5. Servidor de aplicación . . . . .	53
4.8. Estructura de la trama física . . . . .	54
4.9. Aplicativo móvil . . . . .	54
4.10. Adquisición de variables . . . . .	56
4.11. Contenedor para los dispositivos . . . . .	59
4.11.1. Contenedor para el nodo . . . . .	59
4.11.2. Contenedor para el Gateway . . . . .	59
<b>5. Resultados</b>	<b>63</b>
5.1. Consumo energético . . . . .	63
5.2. Pruebas de alcance . . . . .	64
5.3. Análisis del comportamiento del animal . . . . .	67
5.4. Detección del cielo . . . . .	68
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>71</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	71
6.2. Recomendaciones . . . . .	72
6.3. Trabajos futuros . . . . .	72



<b>A. Configuración y programación de dispositivos</b>	<b>73</b>
A.1. Configuración del dispositivo . . . . .	73
<b>Bibliografía</b>	<b>77</b>





---

## Índice de figuras

1.1. Esquema de las hormonas del ciclo reproductivo o estral [7] . . . . .	18
2.1. Esquema de un WSN [9] . . . . .	22
2.2. Tasa de datos vs cobertura de las tecnologías de comunicación por radio[11] . . . . .	22
2.3. LoRaWan[14] . . . . .	23
2.4. Proceso de activación ABP en LoRaWAN[16] . . . . .	24
2.5. Conexión entre maestro y esclavo SPI [19] . . . . .	25
2.6. Conexión entre maestro y múltiples esclavos [18] . . . . .	25
2.7. Conexión entre maestro y múltiples esclavos . . . . .	26
2.8. Diagrama de bloques de UART . . . . .	27
2.9. Raspberry pi 3 B+ . . . . .	28
2.10. Esquema general de un Microcontrolador . . . . .	29
2.11. Diagrama de bloques del funcionamiento de un transceptor [22] . . . . .	30
3.1. Etiqueta detectora de montas [23] . . . . .	31
3.2. Arquitectura del sistema de monitoreo de ganado [29] . . . . .	33
3.3. Resultados de la clasificación K-means [30] . . . . .	33
3.4. Gráficas de los diferentes estados del ganado teniendo en cuenta su actividad [31] . . . . .	34
4.1. Diagrama de bloques del diseño para el prototipo IoT [30] . . . . .	36
4.2. Transceptor Ra-02 [22] . . . . .	37
4.3. Diagrama de bloques del transeptor LoRa Ra-02 . . . . .	37
4.4. Microcontrolador ATmega 1284p . . . . .	38
4.5. Diagrama de bloques del funcionamiento Microcontrolador en el dispositivo . . . . .	38
4.6. Sensor de temperatura y humedad . . . . .	39
4.7. Acelerómetro MPU6050 . . . . .	40
4.8. Sensor FSR . . . . .	40
4.9. Gráfica de la resistencia en función de la fuerza [33] . . . . .	41
4.10. Sensor de corriente . . . . .	41
4.11. Reloj en tiempo real DS3231 . . . . .	42
4.12. Lector de tarjetas SD . . . . .	42
4.13. Diagrama de bloques del diseño del prototipo . . . . .	44
4.14. Diseño del circuito esquemático . . . . .	45
4.15. Diseño en 2D de la cara superior . . . . .	46
4.16. Placa impresa de la cara superior . . . . .	46



4.17. Diseño en 2D de la cara inferior . . . . .	47
4.18. Placa impresa de la cara inferior . . . . .	47
4.19. Diseño en 3d de la placa PCB . . . . .	48
4.20. Vista superior de la placa PCB . . . . .	48
4.21. Diseño final del circuito esquemático para el Gateway . . . . .	49
4.22. Diseño y armado del Gateway . . . . .	49
4.23. Arquitectura de la red LoRaWAN . . . . .	50
4.24. Nodo final- Detector de celo en ganado bovino . . . . .	51
4.25. Agregación de nodos . . . . .	51
4.26. LoRa y Rasperry Pi 3B+ conectados . . . . .	52
4.27. Interfaz gráfica del Application Server . . . . .	53
4.28. Diseño para el envío de la trama de datos . . . . .	54
4.29. Diagrama de flujo para el aplicativo móvil . . . . .	55
4.30. Interfaz gráfica de la aplicación . . . . .	55
4.31. Diagrama de flujo para el cálculo de la actividad física en el ganado bovino . . . . .	57
4.32. Diagrama de flujo para el cálculo de la monta en el ganado bovino . . . . .	57
4.33. Diagrama de flujo la detección de celo en ganado bovino . . . . .	58
4.34. Contenedor para el nodo . . . . .	59
4.35. Contenedor para el nodo . . . . .	60
4.36. Chaleco colocado a la vaca . . . . .	60
4.37. Contenedor para el Gateway . . . . .	61
4.38. Contenedor para el Gateway . . . . .	62
5.1. Gráfica del consumo energético de nodo . . . . .	64
5.2. Ubicación del Gateway . . . . .	65
5.3. Distancias del Gateway a los diferentes puntos del nodo . . . . .	66
5.4. Pérdida de paquetes en función de la distancia . . . . .	67
5.5. Vaca con ID 585 . . . . .	67
5.6. Actividad física del animal cuando se encuentra en Proestro vs Diestro . . . . .	68
5.7. Actividad de las vaca 592 y 583 . . . . .	69
5.8. Vacas para la detección de celo . . . . .	69
5.9. Alertas enviadas al aplicativo móvil . . . . .	70
A.1. Configuración para Gestor de URLs adicionales de tarjeta . . . . .	74
A.2. Configuración para Gestor de URLs Adicionales de tarjeta . . . . .	74
A.3. Interconexión entre master y slave. . . . .	75
A.4. Instalación de tarjetas de MightyCore . . . . .	75





---

## Índice de tablas

4.1. Conexión utilizada para la comunicación entre el microcontrolador y el transceptor. . . . .	43
4.2. Conexión utilizada para la comunicación entre el microcontrolador y el lector SD . . . . .	43
4.3. Conexión utilizada para la comunicación entre el microcontrolador y el RTC. . . . .	43
4.4. Conexión utilizada para la comunicación entre el microcontrolador y el acelerómetro. . . . .	44
4.5. Conexión utilizada para la comunicación entre Raspberry Pi y Ra02 SX1278. . . . .	52
5.1. Coordenadas del Gateway y puntos de referencia en donde se ubica el nodo. . . . .	65



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Gustavo Andrés Vivar Ramón, autor del trabajo de titulación "Diseño de un dispositivo IoT para la detección de celo en ganado bovino", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 08 de noviembre de 2021

Gustavo Andrés Vivar Ramon

C.I: 0105071294



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Pablo Xavier Briones Romero, autor del trabajo de titulación “Diseño de un dispositivo IoT para la detección de celo en ganado bovino”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 8 de noviembre del 2021

Pablo Xavier Briones Romero

C.I: 0107341802



### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Gustavo Andrés Vivar Ramon en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Diseño de un dispositivo IoT para la detección de celo en ganado bovino", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 8 de noviembre de 2021

Gustavo Andrés Vivar Ramon

C.I: 0105071294



### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Pablo Xavier Briones Romero en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Diseño de un dispositivo IoT para la detección de celo en ganado bovino", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 8 de noviembre del 2021

Pablo Xavier Briones Romero

C.I: 0107341802





---

## Agradecimientos

### **A Dios.**

Por darme fuerzas y motivarme cuando lo necesite, por siempre bendecirme con la compañía de mi familia.

### **A mi familia.**

A mis padres, hermanos y sobrinos, gracias por siempre apoyarme y acompañarme. Gracias por esforzarse para aportarme de diferentes maneras algo provechoso para mi vida.

### **A la Universidad de Cuenca.**

Por todos los conocimientos aprendidos, a mis maestros, amigos y compañeros de clases, gracias por la alegría, apoyo y compañerismo que me han brindado en todos estos años universitarios.

### **A la Granja Irquis.**

Especialmente a su Director el Doctor Jhonny Narvaez y al Doctor Carlos Ortuño, por todas las facilidades que nos brindaron para el desarrollo de este proyecto y todas sus enseñanzas

### **A todos mis maestros.**

Especialmente al Ingeniero Santiago Gonzalez por sus conocimientos y devolverme la motivación por las ciencias. Y a mí director de tesis, Ingeniero Fabián Astudillo, por sus aportes en la consecución de este trabajo.

### **A Kevin Piedra.**

Por sus valiosos conocimientos compartidos para el desarrollo de este trabajo.

**Pablo Briones**







---

## Agradecimientos

### **A Dios.**

Por darme la vida, salud y por permitirme concluir mi carrera universitaria.

### **A mis padres.**

Por la formación que me han dado para llegar a ser la persona que soy en la actualidad, por siempre estar a mi lado, por brindarme su amor y su apoyo incondicionalmente. Gracias a ustedes por motivarme siempre para alcanzar todos mis anhelos.

### **A toda mi familia.**

Especialmente a mi hermano, quien ha confiado en mí y ha estado conmigo en todo momento.

### **A todos mis maestros.**

Especialmente a mi tutor de tesis, Ingeniero Fabián Astudillo, por sus aportes en el desarrollo de este trabajo.

### **A la Granja Irquis.**

Especialmente a su Director el Doctor Jhonny Narvaez y al Doctor Carlos Ortuño, por las enseñanzas y facilidades para desarrollar con éxito este trabajo.

### **A Cristina Ramón.**

Por ser una buena amiga y una persona muy especial en mi vida, por ayudarme y apoyarme siempre.

**Gustavo Vivar**





---

## Abreviaciones y Acrónimos

- ABP** Activation by Personalization. [24](#), [50](#)  
**ALU** Unidad Aritmetica y Lógica. [28](#), [29](#)  
**AppEUI** Application Identifier. [24](#)  
**AppKey** Application Key. [24](#)  
**AppSKey** Application Session Key. [24](#), [50](#)  
  
**DevAddr** Device Address. [24](#), [50](#)  
**DevEUI** Device Identifier. [24](#)  
  
**FSR** Force Sensing Resistors. [39](#), [40](#)  
  
**GPRS** General Packet Radio Service. [32](#)  
**GPS** Global Positioning System. [32](#)  
**GSM** Global System for Mobile. [32](#)  
  
**I2C** Inter-Integrated Circuit. [26](#), [39–41](#), [43](#)  
**IA** Inseminación Artificial. [17](#), [18](#)  
**IoT** Internet of Things. [18](#), [22](#), [23](#), [27](#), [34–38](#), [40](#), [44](#), [72](#)  
**IP65** Ingress Protection 65. [59](#)  
  
**LoRa** Long Range. [21](#), [23](#), [37](#), [38](#), [48](#), [50](#), [52](#), [53](#), [71](#)  
**LoRaWAN** Long Range Wide Area Network. [21](#), [23](#), [24](#), [35](#), [50](#), [52](#), [53](#)  
**LPWAN** Low Power Wide Area Network. [21](#), [22](#)  
  
**MAC** Media Access Control. [23](#), [50](#)  
**MIC** Message Integrity Code. [24](#)  
**MQTT** Message Queue Telemetry Transport. [54](#)  
  
**NwkSKey** Network Session Key. [24](#), [50](#)  
  
**OTAA** Over The Air Activation. [24](#)  
  
**PBC** Printed Circuit Board. [35](#), [50](#)  
  
**RTC** Real Time Clock. [41](#), [43](#), [44](#)  
**RXD** Received Data. [26](#)  
  
**SCL** Serial Clock. [26](#), [39](#)



**SDA** Serial Data. [26](#), [39](#)

**SPI** Serial Peripheral Interface. [25](#), [37](#), [42–44](#), [48](#), [52](#), [71](#), [73](#)

**TCP/IP** Transmission Control Protocol/Internet Protocol. [23](#)

**TXD** Transmitted Data. [26](#)

**UART** Universal Asynchronous Receiver Transmitter. [26](#)

**WiFi** Wireless Fidelity. [22](#)

**WSN** Wireless Sensor Network. [21](#), [32](#)



---

## Introducción

Este capítulo expone la identificación del problema (Sección 1.1), justificación del proyecto de investigación (Sección 1.2), alcance (Sección 1.3) y los objetivos a cumplir del presente proyecto (Sección 1.4).

### 1.1. Identificación del problema

La Universidad de Cuenca cuenta con unidad de producción lechera. Esta unidad funciona en la granja Irquis, la cual se encuentra ubicada a 20.5 km desde el campus Yanuncay. Actualmente, la unidad de producción lechera utiliza [Inseminación Artificial \(IA\)](#) en ganado bovino. Esta es una técnica ampliamente aceptada y utilizada a nivel mundial. Este método permite prescindir del uso de los toros, que muchas veces son de difícil manejo. Usando esta técnica se mejoran las tasas de preñez con respecto a la monta natural; y se incrementa la eficiencia en los registros de reproducción, y el manejo de las granjas [1]. Para realizar la [IA](#), el bovino debe encontrarse en celo. En función de la calidad con que se ejecuta la técnica de detección de celos, aumenta la eficacia de la [IA](#). Según [2] en Estados Unidos las pérdidas por fallas en la detección de celo superan los 300 millones de dólares al año; en Ecuador de la misma forma, la efectividad en la detección de estros dentro de un rebaño bovino genera considerables pérdidas económicas a la ganadería lechera y cárnica [3]. En consecuencia, una detección oportuna es el mayor desafío que enfrentan las granjas de este tipo. La granja de Irquis utiliza métodos de observación continua para detectar el celo en sus 47 vacas que tiene en producción; los resultados obtenidos son validados en los registros reproductivos del software “Dairylive” el cual es propio para la ganadería. Estos métodos no son lo suficientemente confiables, ya que se registran fallas hasta del 60 por ciento según [4]; sin embargo, son usados en la mayor parte de granjas. La observación al ganado es realizada en la mayoría de las veces por los vaqueros. El vaquero debe estar atento al incremento de la actividad física; la vaca aumenta sus desplazamientos, en vez de pastorear está inquieta. Según autores de [5] en condiciones intensivas una vaca en celo es 2,76 veces más activa que una que no lo está y hasta 4 veces más si tiene libertad de movimiento; la detección del cambio de rutina aumenta la probabilidad de detección del celo entre un 70 y 80 por ciento. Otro síntoma se manifiesta cuando intenta montar o solicita ser montada por otras vacas. Estos métodos, necesitan de personal que monitorice de manera constante a los animales para observar dichos comportamientos.

## 1.2. Justificación

De los estudios analizados existen métodos invasivos y no invasivos. Se analizó la posibilidad de trabajar con métodos invasivos; sin embargo, el veterinario Cornelio Rosales y Dr. Jhonny Narváez, docentes de la Universidad de Cuenca en la facultad de ciencias agropecuarias, indicaron que esto puede causar varios efectos secundarios como es inflamación en los genitales del animal lo que dificultaría la [IA](#) y la alta posibilidad de cambiar el periodo de celo. Por estos motivos, se descartó realizar experimentos usando métodos invasivos.

En lo que se refiere al ciclo reproductivo en el ganado bovino los autores de [\[6\]](#) lo dividen en tres fases: 1) Fase Folicular (Pro-celo); 2) Fase Periovulatoria (Celo y Meta-celo); y, 3) Fase Luteal (Diestro). El día cero del ciclo reproductivo es el día del celo o calor aparente con signos manifiestos y se considera el día del comienzo del nuevo ciclo; sin embargo, y para efectos de mejor entendimiento, la descripción se realizará a partir de la etapa de pro-celo del ciclo reproductivo anterior y finalizará con el día de celo del siguiente ciclo (ver Figura [1.1](#)).

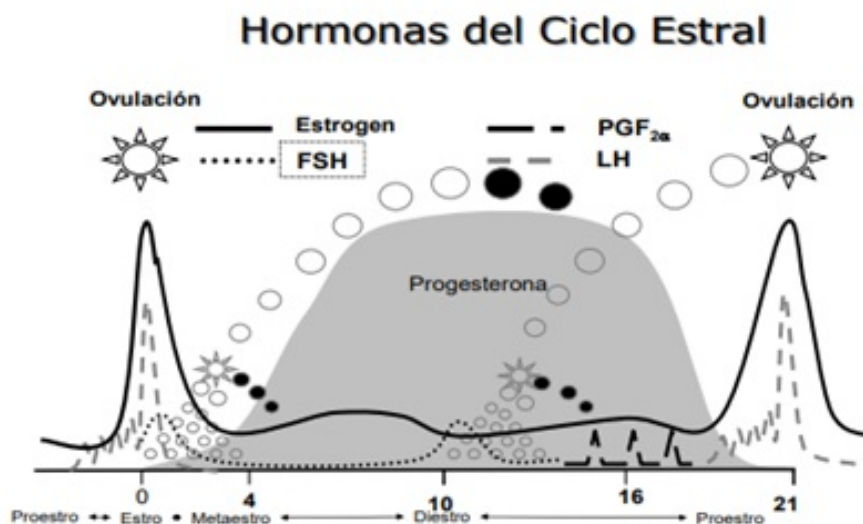


Figura 1.1: Esquema de las hormonas del ciclo reproductivo o estral [\[7\]](#)

La detección del ciclo estral es un factor clave para aumentar la producción en granjas lecheras. La detección del celo normalmente se realiza por medios visuales, lo que genera gastos agregados tanto económicos como de tiempo para el ganadero; por esta razón, se diseñará un dispositivo no invasivo capaz de monitorear variables indicadoras de un posible celo.

## 1.3. Alcance

La contribución de este trabajo se enfoca en el diseño e implementación de un dispositivo [Internet of Things \(IoT\)](#) no invasivo para la detección del celo. Se realizará una revisión de literatura, de esta manera se podrá definir los parámetros más efectivos a ser monitorizados en el animal con diferentes sensores. El objetivo es tener una alta efectividad a la hora de la detección de celo en el ganado bovino [\[5, 7, 8\]](#). Los datos obtenidos serán enviados de manera inalámbrica a través de un Gateway a un centro de datos. En el centro de datos se procesará la información para determinar si la vaca se encuentra en celo. Adicionalmente, se analizará el



consumo energético del dispositivo, su autonomía, y el alcance entre los nodos y el Gateway en una granja. El dispositivo permitirá la adquisición de datos del comportamiento del ganado bovino. El prototipo estará basado en un microcontrolador ATmega1284 de bajo consumo energético y un transceptor LoRa SX1278. Adicionalmente, se propone analizar el consumo energético y que la comunicación tenga un alcance de al menos 1 Km.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Diseñar e implementar un dispositivo IoT para detectar el celo en un animal vacuno.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar el PCB para el dispositivo sensor con elementos de montaje superficial y de bajo consumo energético.
- Diseñar el PCB para el Gateway.
- Diseñar e implementar la arquitectura de adquisición y comunicación de los dispositivos.
- Probar el dispositivo en laboratorio y en campo, y analizar el consumo energético, la autonomía y el alcance.
- Implementar el algoritmo que permita realizar la detección de celo en función de los valores obtenidos de los sensores.







---

## Marco teórico

En el presente capítulo se presentan varios conceptos que son usados en el documento. En la Sección 2.1 se mencionan los aspectos generales de las [Wireless Sensor Network \(WSN\)](#). En la Sección 2.2 se describe lo que es una red [Low Power Wide Area Network \(LPWAN\)](#). En la Sección 2.3 se explican las características y funcionamiento de la tecnología [Long Range \(LoRa\)](#) y de su protocolo [Long Range Wide Area Network \(LoRaWAN\)](#). En la Sección 2.4 se detallan los protocolos de comunicación que se usaron para el desarrollo de la investigación. Finalmente, en la Sección 2.5 se describen de forma general los elementos principales a utilizar como es la Raspberry pi, microcontroladores y transceptores.

### 2.1. Red de sensores inalámbricos

Una red de sensores inalámbricos [WSN](#) está compuesta por dispositivos autónomos denominados nodos, que usan sensores para monitorear condiciones físicas o ambientales como, por ejemplo: temperatura, movimiento, humedad, presión, etc. Los datos monitoreados son enviados a un Gateway el mismo que se encarga de la comunicación con un servidor o un dispositivo de almacenamiento. La energía consumida por los nodos dependerá del ancho de banda utilizado, potencia de transmisión y de la distancia al Gateway. Los nodos están alimentados por baterías, activándose y desactivándose según los requerimientos del proyecto en los que se utilice una red [WSN](#) [9]. En la Figura 2.1 se observa una aplicación de estas redes.

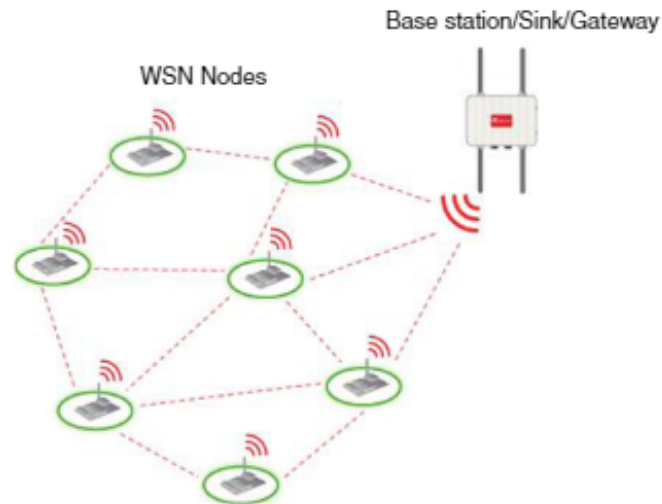


Figura 2.1: Esquema de un WSN [9]

## 2.2. LPWAN

En la actualidad el uso de los dispositivos **IoT** ha ido en aumento. Estas tecnologías se las puede encontrar en áreas como seguridad, medicina, agricultura, ciudades inteligentes, etc. Diferentes tecnologías pueden ser aplicadas en función de los requerimientos de una aplicación. Tecnologías como ZigBee y Bluetooth están limitadas por su rango de comunicación. Las tecnologías celulares presentan mayor cobertura, pero su consumo energético es alto. También se tiene **Wireless Fidelity (WiFi)** con un corto alcance de comunicación, consumo energético alto, pero su ventaja es su alta tasa de datos.

En algunas aplicaciones específicas es necesario un largo alcance de transmisión, baja tasa de datos, bajo consumo energético y bajo costo. Las redes **LPWAN** solventan los requerimientos antes mencionados [10]. La Figura 2.2 ilustra las ventajas de **LPWAN** en comparación con otras tecnologías de radio.

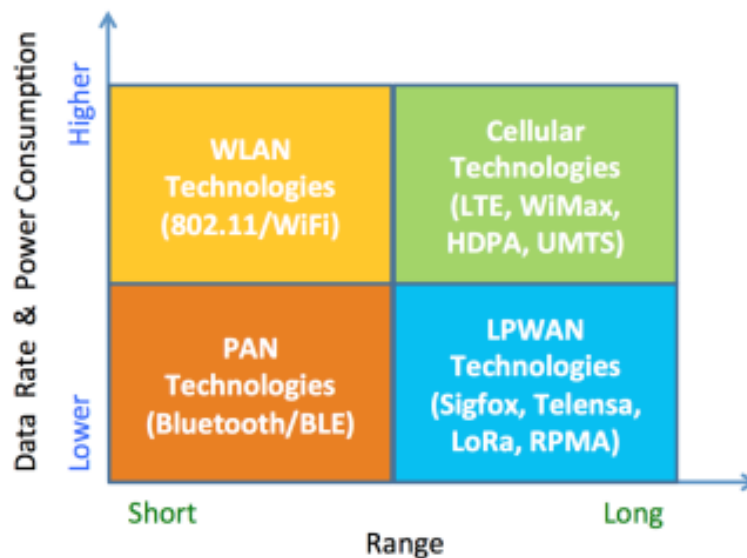


Figura 2.2: Tasa de datos vs cobertura de las tecnologías de comunicación por radio[11]

## 2.3. LoRaWAN

Las principales ventajas de esta tecnología es la comunicación de largo alcance y el bajo consumo energético. Estas características han permitido nuevos desarrollos tecnológicos en las comunicaciones inalámbricas, sobre todo en el campo de las aplicaciones IoT en espacios abiertos. LoRaWAN usa una topología de estrella, la misma está formada por nodos, Gateways y un servidor de red (ver Figura 2.4). Los nodos finales solo pueden comunicarse con el Gateway. Los dispositivos utilizan la capa física LoRa para intercambiar mensajes con el Gateway. Para la comunicación entre el Gateway y el servidor se utiliza la pila de protocolos Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) [12, 13].

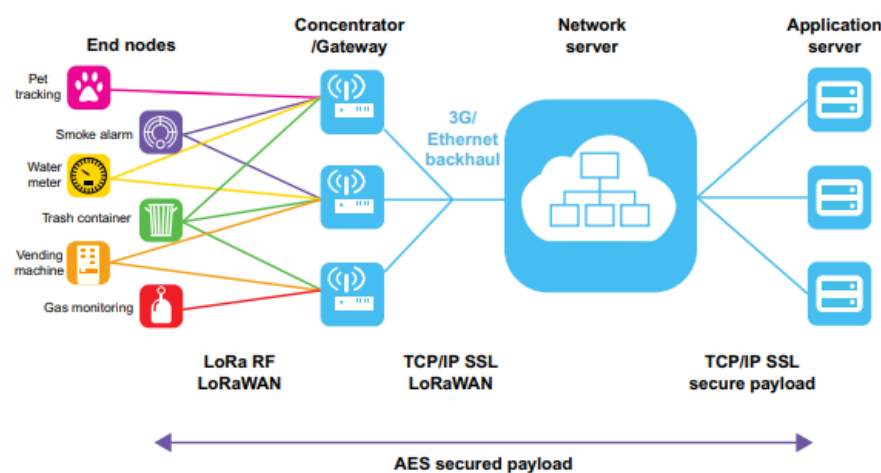


Figura 2.3: LoRaWan[14]

Los nodos pueden ser sensores o actuadores (ver Figura 2.4). El servidor de red está encargado de la seguridad y la correcta recepción de la trama de datos. Finalmente, se tiene el servidor de aplicación, que sirve para decodificar y visualizar datos.

En lo que se refiere a la capa **Media Access Control (MAC)** para los nodos se manejan 3 clases, para optimizar la latencia en la comunicación descendente de la red y ahorrar energía. Esta característica permite que se pueda acoplar la tecnología a las necesidades de las aplicaciones finales.

- **Clase A:** Es una comunicación bidireccional entre un nodo y el servidor de red. La transmisión de enlace descendente que va desde el servidor al dispositivo, solo puede ocurrir después de una transmisión de enlace ascendente, desde el dispositivo al servidor, es decir, el dispositivo activa al servidor.
- **Clase B:** En principio tiene la misma funcionalidad de la clase A, con la diferencia de admitir transmisión de enlace descendente en momentos programados.
- **Clase C:** Esta permite la transmisión de enlace descendente en cualquier momento, excepto cuando el dispositivo final está transmitiendo.

### 2.3.1. Mecanismo de activación LoRaWAN

En LoRaWAN la seguridad se implementa en la **MAC** de forma eficaz. La conexión de los dispositivos a la red LoRaWAN es uno de los primeros aspectos de seguridad a tratarse, solo los dispositivos que tengan autorización se podrán unir a la red.

El mecanismo para que un dispositivo se conecte a la red LoRaWAN se denomina como registro y activación de un dispositivo final. El dispositivo final almacena los siguientes parámetros: **Device Address (DevAddr)**, **Application Identifier (AppEUI)**, **Network Session Key (NwkSKey)** y **Application Key (AppKey)**. [15]

El proceso de activación se puede realizar usando dos métodos: **Over The Air Activation (OTAA)** o **Activation by Personalization (ABP)**.

**OTAA:** el dispositivo final se configura de manera manual con los siguientes parámetros: identificador global **Device Identifier (DevEUI)** que es único para cada dispositivo, identificador de aplicación **AppEUI** y una clave de aplicación **AppKey** que derivarán en las claves de sesión y claves de aplicación, almacenadas en el dispositivo final, para conectar exitosamente el dispositivo con la red.

**ABP:** el dispositivo final se configura directamente con las llaves de sesión **Application Session Key (AppSKey)** y **NwkSKey**, el servidor lo identifica y le da acceso al dispositivo de inmediato [16].

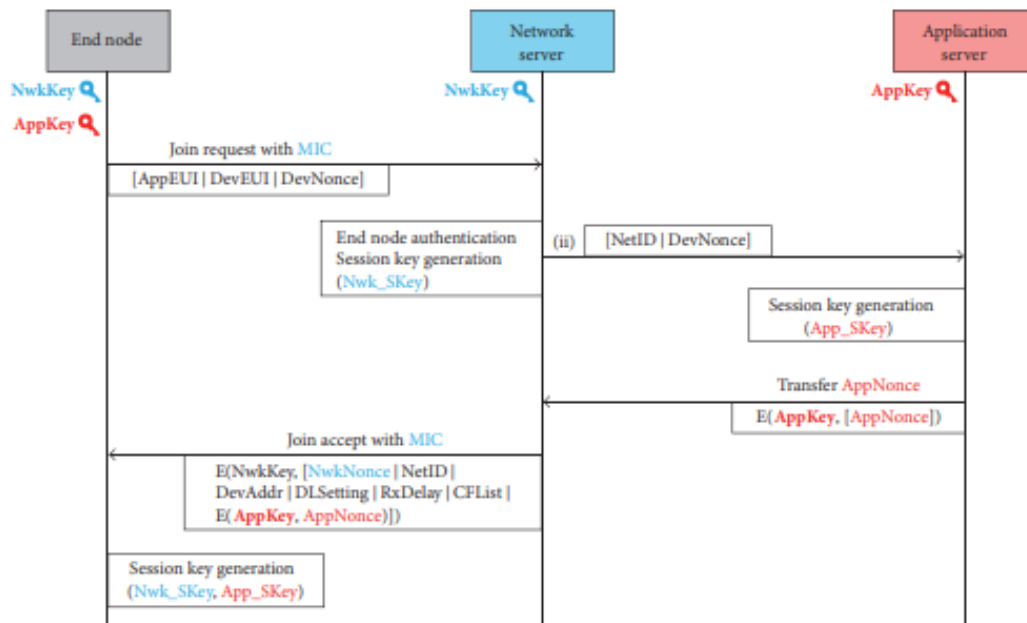


Figura 2.4: Proceso de activación ABP en LoRaWAN[16]

### 2.3.2. Seguridad en una red LoRaWAN

El proceso de activación se da con un mecanismo de autenticación mutua entre el dispositivo final y el servidor de red, el acceso de los dispositivos a la red se da por autorización, el dispositivo final que contiene **AppKey** calcula el **Message Integrity Code (MIC)** utilizando la clave para enviar un mensaje de petición de conexión al servidor, que conoce la **AppKey**, la utiliza para comprobar si el mensaje es auténtico. Una vez comprobado la autenticidad, el servidor envía un mensaje de aceptación a la red, calculando el **MIC**, el dispositivo comprueba el mensaje y se establece la conexión dispositivo - servidor.

Finalmente para el tráfico entre el dispositivo y el servidor se cifra utilizando el **AppSKey** y **NwkSKey**, los cuales se generan del **AppKey** y únicamente las conocen el dispositivo y el servidor [17].

## 2.4. Protocolos de comunicación

### 2.4.1. Comunicación SPI

La comunicación [Serial Peripheral Interface \(SPI\)](#) usa un reloj síncrono, esto para mantener una sincronía entre la transmisión de información entre los diferentes dispositivos. Esta comunicación usa dos hilos para su transmisión, que son de maestro a esclavo y esclavo maestro. Ya que la transmisión es en serie, se envía un bit del mensaje en cada ciclo de reloj. La comunicación contiene un bus que emplea 4 señales para realizar las comunicaciones [18, 19]. En la Figura 2.5 se muestra la conexión maestro esclavo con sus diferentes buses. Mientras que la Figura 2.6 detalla la conexión maestro a múltiples esclavos.

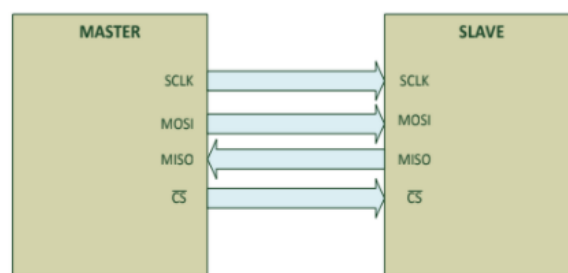


Figura 2.5: Conexión entre maestro y esclavo SPI [19]

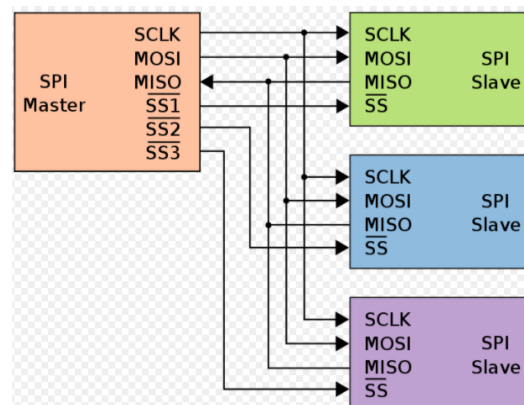


Figura 2.6: Conexión entre maestro y múltiples esclavos [18]

A continuación se detalla los diferentes buses de la comunicación [SPI](#).

- SCLK: Es la señal de reloj generada por el maestro para la sincronización en la transferencia de información.
- MOSI: Es la línea de datos que sirve para la transferencia de información del maestro al esclavo. Otra de sus funciones es conectar a todos los esclavos presentes en el bus, así poder comunicarse con ellos con una única línea.
- MISO: En esta conexión se logra el envío de datos desde el esclavo hacia el maestro. De la misma forma todos los dispositivos esclavos se conectan a la misma línea así el maestro recibe datos de todos a través de una sola entrada.
- CS: Es la señal que selecciona al esclavo que gestionará el dispositivo maestro, cada esclavo posee su

entrada de selección. Así mismo, el maestro tiene una salida para cada esclavo conectado al bus. El maestro usa esta línea para informar al esclavo que se inicia el intercambio de información.

### 2.4.2. Comunicación I2C

El protocolo **Inter-Integrated Circuit (I2C)** se basa en una comunicación síncrona con una interfaz de dos vías la cual funciona de forma semi-dúplex, es decir, es un envío de datos bidireccional pero no de una manera simultánea. La misma usa un maestro y un esclavo funcionando con velocidades de hasta de 400 Kbps. Los dispositivos **I2C** cuentan con dos pines:

- Reloj serial **Serial Clock (SCL)**: El maestro genera la señal de reloj que generalmente se encuentra en el rango de KHz. La señal es enviada por la línea **SCL**.
- Datos en serie **Serial Data (SDA)**: Comunica al maestro con el esclavo para el envío de datos [20].

En la Figura 2.7 se aprecia la conexión maestro a múltiples esclavos de la comunicación **I2C**.

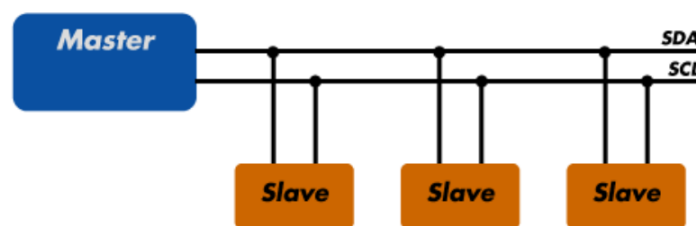


Figura 2.7: Conexión entre maestro y múltiples esclavos

### 2.4.3. Comunicación UART

Es un protocolo de comunicación entre dispositivos para la adquisición de datos. Es uno de los más utilizados por su simplicidad, se lo encuentra actualmente en todas las computadoras en forma de USB. Para realizar la transmisión de datos; se utilizan 2 líneas que son Datos Transmitidos **Transmitted Data (TXD)** y Datos Recibidos **Received Data (RXD)**.

El **Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART)** es un claro ejemplo de comunicación serial. Este protocolo se encarga de convertir los datos seriales a paralelos cuando actúa como receptor, y de convertir los datos de paralelos a seriales cuando se trata de transmisor[21].

Hay que tomar en cuenta que la transmisión es asíncrona, por lo que es posible enviar datos por un pin mientras se recibe por otro. También una parte importante de esta comunicación es especificar la velocidad de transferencia de datos. Esta velocidad se mide en baudios, que representa el número de variaciones de la señal por segundo en una transmisión digital [20]. En la Figura 2.8 se observa el diagrama de bloques del funcionamiento del protocolo **UART**.

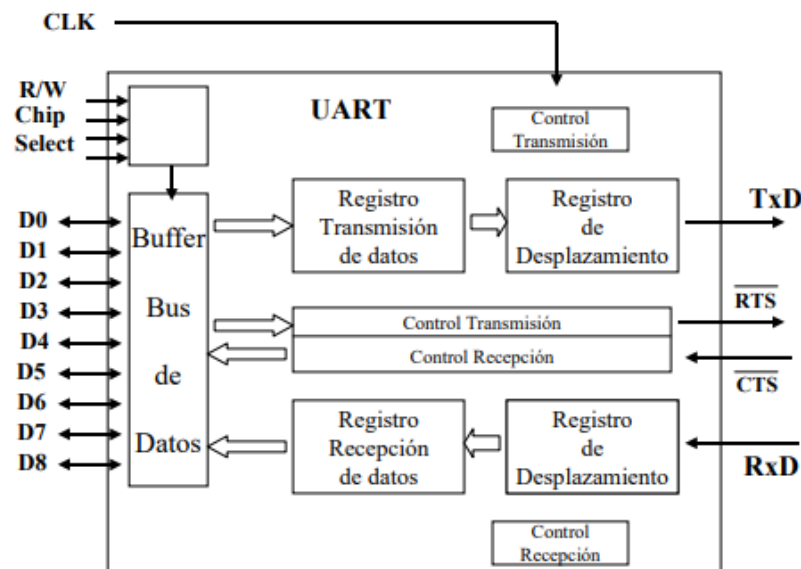


Figura 2.8: Diagrama de bloques de UART

## 2.5. Componentes principales

En esta sección se describe de forma general los componentes a utilizar en el sistema y en el dispositivo IoT prototipo.

### 2.5.1. Raspberry pi

La Raspberry Pi es un micro-ordenador de tamaño reducido y bajo coste. Para interactuar con el dispositivo se puede conectar a elementos de hardware como teclado, pantalla, etc. Se usa comúnmente en proyectos electrónicos y para desarrollar tareas básicas como navegar por Internet, hojas de cálculo, procesador de textos. Las especificaciones de hardware y sus modelos más relevantes desde su creación se mencionan a continuación:

- Raspberry Pi A: El primer modelo sacado al mercado, cuenta con las siguientes características.
  - CPU : BRAZO 700Mhz
  - RAM : 256 Mo
  - 1 puerto USB
  - 8 pines GPIO
  - Ranura HDMI , audio y SD
- Raspberry Pi 3A+ : Sale al mercado en noviembre de 2018, con las siguientes características:
  - Una arquitectura de 64 bits con una CPU 4xCore a 1.4Ghz
  - 512 MB de RAM
  - Todos los componentes de red necesarios: Gigabit LAN, WiFi y Bluetooth
- Raspberry Pi B: Sus características principales son:
  - CPU : BRAZO 700Mhz
  - RAM : 512 M

- 2 puertos USB
- Ranura HDMI , RCA Audio y SD
- Conector Ethernet 10/100
- 8 pines GPIO
- Raspberry pi 3B: Con la versión 3 añade posibilidades inalámbricas, con Wi-Fi y Bluetooth integrados directamente en el tablero principal. Finalmente, la Raspberry Pi 3 B + incorpora dos mejoras significativas:
  - LAN : Gigabit Ethernet
  - CPU : 4x 1,4 Ghz
- Raspberry Pi 4: La última versión en el mercado; ha incorporado las siguientes características.
  - Chip ARM de 1,5 GHz
  - Puertos USB3
  - Gigabit Ethernet
  - Opciones de memoria RAM con 4GB y con 8 GB.



Figura 2.9: Raspberry pi 3 B+

### 2.5.2. Microcontroladores

Los microcontroladores son circuitos integrados; estos son los componentes principales de una aplicación embebida. Tienen la capacidad de controlar elementos tanto de entrada como salida. Cuentan con un procesador y memorias flash y RAM, así como un procesador. Sus funciones principales es la de automatizar procesos y procesar información. Entre los grandes fabricantes de microprocesadores tenemos a Microchip Technology Inc, Atmel Corporation, y Motorola.

A continuación se describirá las partes importantes de los microcontroladores.

- **Procesador:** Incluye tres elementos principales, **Unidad Aritmética y Lógica (ALU)**, unidad de control y registro; los mismos que son descritos a continuación.



- **ALU:** Esta unidad contiene circuitos digitales del tipo combinatorio, su función principal es realizar operaciones aritméticas del procesamiento lógico (sumadores, multiplicadores, etc.).
- **Unidad de control:** Su función es recibir datos correctos y realizar instrucciones a cada momento. Controla las unidades de ejecución y **ALU** del procesador.
- **Registros:** Son las memorias de los procesadores de alta velocidad y poca capacidad y tienen como función principal almacenar datos, comandos, instrucciones.
- **Periféricos:** Son circuitos que permiten una interacción con el mundo exterior al microcontrolador. Su función principal es habilitar o deshabilitar salidas digitales.
- **Memoria:** Consta de 3 partes principales que son: La memoria para el programa (FLASH), la memoria para los datos o variables del programa (RAM) y la memoria para configuraciones o no volátil (EEPROM).

En la Figura 2.10 se aprecia un esquema general de un microcontrolador, con los elementos internos más representativos.

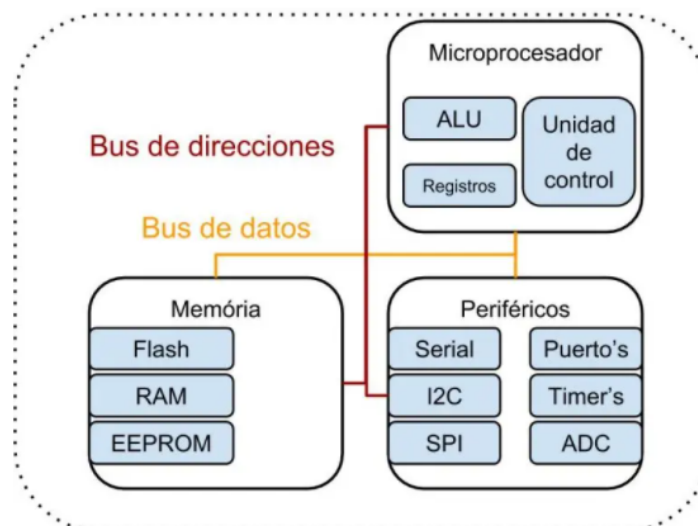


Figura 2.10: Esquema general de un Microcontrolador

### 2.5.3. Tranceptores

En el mundo de las redes y telecomunicaciones un transceptor es un dispositivo con funciones de transmisión y recepción. Dado que el transmisor y el receptor comparten el mismo circuito la comunicación es semi-duplex; esto es mientras se transmite no se puede recibir datos y viceversa. Las señales transmitidas, aunque sean de una sola fuente, pueden ser recibidas por múltiples receptores.

- **Transmisor:** un transmisor de radio es un dispositivo electrónico cuya función es codificar señales mecánicas, eléctricas u ópticas, para luego amplificarlas y transmitir las a través de una antena RF [22].
- **Receptor:** un receptor de radio es un dispositivo electrónico que percibe señales electromagnéticas a través de una antena RF, para luego filtrar y amplificar las señales recibidas. En la Figura 2.11 se muestra el diagrama de bloques del funcionamiento de un transceptor comercial [22].

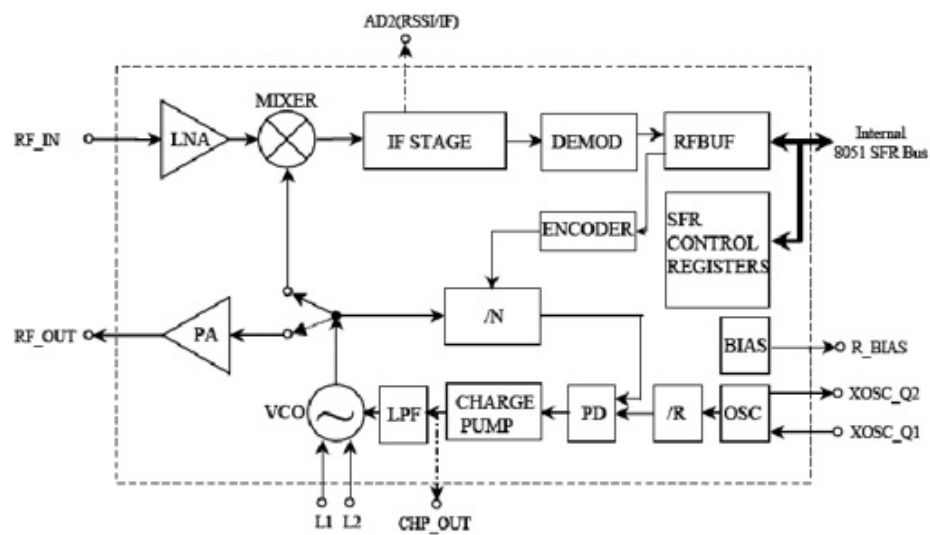


Figura 2.11: Diagrama de bloques del funcionamiento de un transceptor [22]

---

## Estado del Arte

En el presente capítulo se muestran los trabajos realizados de investigación y desarrollo enfocados en el registro de datos para el monitoreo de ganado bovino. Se presenta un resumen de trabajos relevantes y sus diferentes resultados.

En trabajos de detección de celo para ganado bovino usando métodos visuales, los autores de [23] analizan las etiquetas detectoras de montas (observar Figura 3.1). Estos son parches que se colocan en la base de la cola de la vaca; estos esparcen pintura en el área cuando el animal es montado. Dependiendo de la raza, este método pueden alcanzar hasta un 80 por ciento de efectividad a la hora de la detección del celo.



Figura 3.1: Etiqueta detectora de montas [23]

En el mismo aspecto de métodos visuales, en los trabajos [5] y [24], los autores analizan la actividad física en el ganado bovino a la hora de la detección de celo. Los autores mencionan que una vaca en celo es 2,76 veces más activa que una que no lo está y hasta 4 veces más si tiene libertad de movimiento. La detección del cambio de rutina aumenta la probabilidad de detección del celo hasta un 80 por ciento. Esto conlleva que sea una de las variables más efectivas para la detección del celo por su alta fiabilidad.

En trabajos con monitorización inalámbrica, los autores de [25] proponen el monitorio de ganado bovino en Colombia. Las variables a medir fueron la temperatura corporal del animal, el ritmo cardíaco y su posicionamiento geográfico, para lo último utilizan un módulo [Global Positioning System \(GPS\)](#) llamado L80. El sensor seleccionado para la temperatura fue el termistor LM35 por su bajo costo, por ser de pequeño tamaño y por múltiples características técnicas. El sensor para medir el ritmo cardíaco fue un fotoplesmitógrafo, el cual detecta la luz que traspasa una arteria y mide los pulsos cardíacos. Los tres módulos utilizan un mismo microcontrolador para posteriormente transmitir sus datos a mediante la tecnología Zigbee a una estación base, la cual retransmitirá a un servidor usando [General Packet Radio Service \(GPRS\)](#)/[Global System for Mobile \(GSM\)](#).

En otros trabajos de redes inalámbricas aplicadas a la ganadería, los autores de [26] proponen la monitorización de rebaños bovinos. Esta investigación fue realizada por la Universidad de São Paulo. La aplicación se desarrolló usando redes de sensores inalámbricos, para lo cual construyeron una infraestructura con instrumentación electrónica y comunicación por radio-frecuencia. Los prototipos construidos recolectaron datos de la actividad eléctrica cerebral y temperatura corporal de un ganado bovino. Un software que simula el desplazamiento de un rebaño fue desarrollado a fin de conocer el comportamiento general de las vacas. Los resultados que alcanzaron mostraron que es posible utilizar redes [WSN](#) para obtener datos fisiológicos de un animal.

En lo referente a la detección de celo, los autores de [27] han desarrollado un nuevo tipo de podómetro. Este es llamado ALT; tiene tres parámetros de medición (actividad, tiempo de inactividad y temperatura). Con este sistema es posible seleccionar diferentes intervalos de tiempo entre 1 y 60 minutos para monitoreo continuo. Los resultados para la detección del estro fueron de un 70 por ciento. La alta correspondencia entre los parámetros de medición, la actividad y el tiempo de reposo permite hacer detección temprana de las enfermedades de los animales y el momento del ciclo del estro.

En el mismo ámbito, en el trabajo desarrollado en el instituto tecnológico de Buenos Aires [28] propone un sistema electrónico capaz de detectar el celo en vacas. La efectividad del dispositivo propuesto es superior al 80 por ciento. El sistema se compone de un acelerómetro, un transceptor y de una memoria para el almacenamiento de la información; en cada vaca existe un detector con el correspondiente transmisor. Este dispositivo es colocado en un collar al animal. La información capturada es enviada a la estación central ubicada en la granja. En la estación se procesa y almacena la información para el uso estadístico o veterinario.

En Vietnam una de sus principales actividades es la ganadería. En una investigación realizada por [29] propone la construcción de un dispositivo de bajo costo que pueda detectar el estado de las vacas. Para ello ocupan un acelerómetro en los tres ejes ADXL345. Con los datos del mismo construyen un algoritmo de decisión para la clasificación y detección de eventos de salud como la cojera o el ciclo estral.

En la Figura 3.2 se observa el diagrama de la arquitectura del sistema de monitoreo de ganado. Este sistema entrega como resultado múltiples comportamientos de una vaca en base a su acción física. Con esta investigación han demostrado que los acelerómetros se pueden utilizar para reconocer patrones de comportamiento; entre los cuales se tiene que el animal esté acostado, alimentándose o caminando. Con este estudio se tiene una idea clara de como usar los acelerómetros e implementar un algoritmo que permita medir la actividad física de una manera



Figura 3.2: Arquitectura del sistema de monitoreo de ganado [29]

eficaz.

En el ámbito de la interpretación de datos, los autores de [30] proponen usar el algoritmo K-means para la clasificación de datos. Para esto analizan la posición y ángulo de la cabeza de la vaca, con los datos obtenidos aplican el algoritmo para clasificar el comportamiento animal en estado activo o inactivo. Como resultados de esta investigación el algoritmo produjo dos conjuntos de datos; con un ángulo de la cabeza en alto es un estado inactivo y con un ángulo bajo un estado activo. Por lo tanto muestran que el algoritmo puede ser suficientemente robusto con respecto a los errores de posición aleatorios.

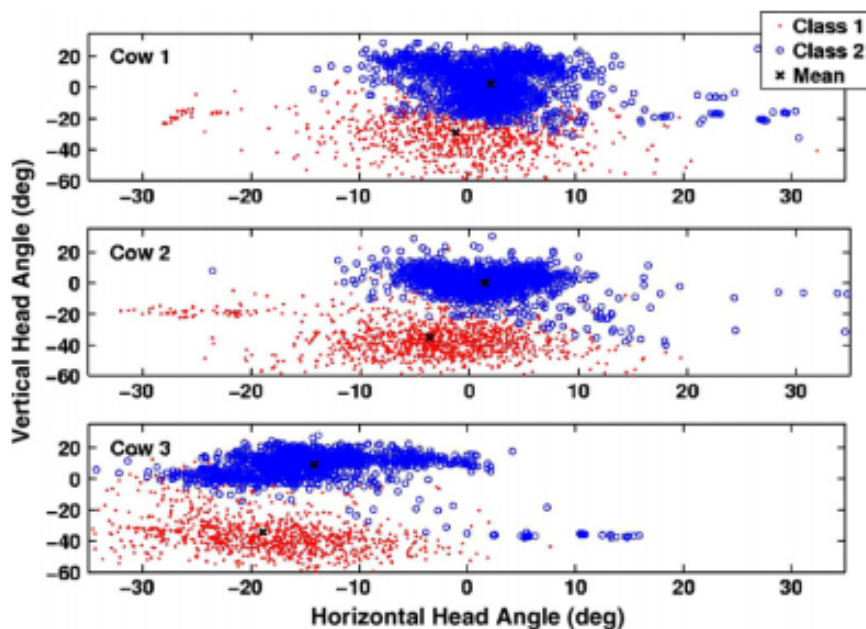


Figura 3.3: Resultados de la clasificación K-means [30]

En la Figura 3.3 se muestra los resultados de la clasificación de K-means. Se ve las gráficas de tres animales. El grupo de puntos rojos es interpretado como actividad, mientras que la del grupo de círculos azules se interpreta como inactividad del animal.

Los autores de [31] mencionan que la detección precisa del estro en las vacas es esencial para el éxito en la

inseminación, ya que con métodos tradicionales como la observación, dependerá mucho de la experiencia del ganadero que con que frecuencia lleva un control visual. Este trabajo propone la integración de dispositivos IoT y el aprendizaje automático para predecir las enfermedades y el estro en el ganado. El dispositivo usa acelerómetros conectados a los animales. Después analizan los datos con algoritmos de aprendizaje para detectar síntomas como enfermedades y estro. Como resultados, este trabajo logró mejorar la detección en comparación con métodos de observación. Con los patrones obtenidos demostraron que el movimiento en las vacas en celo aumenta considerablemente, por lo tanto este sistema tiene la capacidad de identificar periodos de celo en vacas lecheras, lo que aumentaría la reproducción y a su vez la producción de leche en granjas de este tipo.

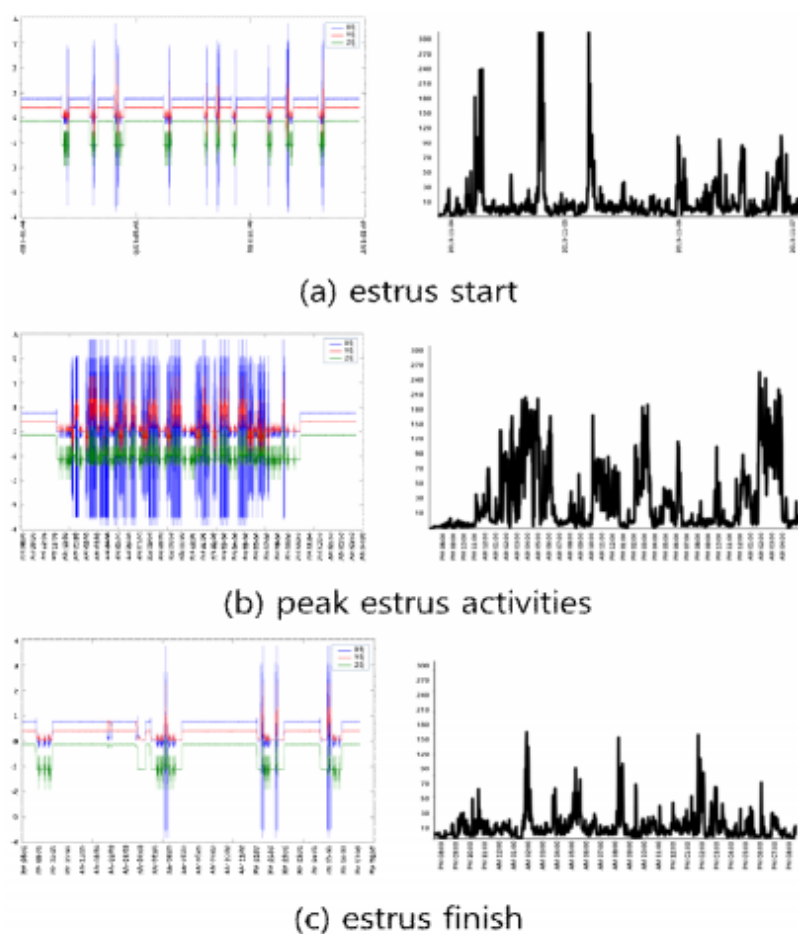


Figura 3.4: Gráficas de los diferentes estados del ganado teniendo en cuenta su actividad [31]

Después de la revisión bibliográfica realizada, se concluye, que los métodos con mayor porcentaje de éxito para la detección de celo son, el cambio en la actividad física y las montas que se producen cuando la vaca se encuentra en estado de estro. Por lo que para el desarrollo del prototipo se usará un sensor de presión, el mismo estará colocado en la base de la cola del animal, con esto se reemplazar los parches de pintura. También se usará un acelerómetro para monitorear la actividad física.



---

## Diseño e Implementación

En el presente capítulo se muestra los aspectos generales del dispositivo [IoT](#), sus configuraciones, datos técnicos, conexiones y la metodología usada. Primero, se analizarán las variables a ser monitorizadas en el animal (Sección [4.1](#)). Después, se indicará cuales son los requerimientos que el dispositivo debe cumplir (Sección [4.2](#)). Luego se dará una descripción de todos los elementos empleados (Sección [4.3](#)). A continuación, se presenta las conexiones del microcontrolador hacia el resto de los elementos (Sección [4.4](#)). Posteriormente se describe el diseño y desarrollo para el aspecto final del circuito electrónico tanto en esquemático como en [Printed Circuit Board \(PCB\)](#), para el nodo y el Gateway (Sección [4.5](#) y Sección [4.6](#)). Después se describe la aplicación del protocolo [LoRaWAN](#), y el envío de la trama de datos (Sección [4.7](#) y Sección [4.8](#)). En las Secciones [4.9](#) y [4.10](#) se muestra el desarrollo del aplicativo móvil y la descripción de los diagramas de flujo de los algoritmos utilizados. Finalmente, se muestra los contenedores para los diferentes dispositivos (Sección [4.11](#))

### 4.1. Variables a ser monitorizadas en el animal

En base a la revisión bibliográfica realizada en el Capítulo [3](#) se plantea realizar la detección interpretando la información de dos sensores. El primero será un sensor de presión, el cual irá colocado en la parte trasera de la cola, esto permitirá detectar la monta en el animal. El segundo sensor es un acelerómetro, para monitorizar la actividad física del animal. Estos parámetros fueron seleccionados por su alta efectividad [[5](#), [7](#), [8](#)].

#### 4.1.1. Actividad física

Para el prototipo en cuestión, se ha elegido reemplazar los llamados podómetros, por un acelerómetro digital, el cual medirá las aceleraciones en el animal, pudiendo así ver el cambio en su actividad física. Para contar la cantidad de pasos dados se usará un algoritmo que usará las aceleraciones obtenidas. Así se determinará un umbral para detectar un posible celo. Para usar este sistema las vacas no deben estar amarradas, ya que en estos casos no se puede apreciar el cambio en la actividad física.

### 4.1.2. Monta del animal

Otra variable a ser determinada es la monta. Este comportamiento se manifiesta cuando el animal solicita ser montado por otras vacas. En la etapa de estro existe un comportamiento de bisexualidad en la que se da la monta entre vacas. El animal en particular queda quieto al ser montado por otros animales del ganado. Para evitar el constante monitoreo visual, existen mecanismos que permiten confirmar si la monta se llevó a cabo. Entre ellos está la pintura encapsulada; la cual explota luego de que otra vaca realiza la monta, esparciendo la pintura en el lomo del animal y dejando el indicio de que el acto se llevó a cabo, como se indicó en el Capítulo 3. Para el prototipo, se propone cambiar el método visual y el del encapsulamiento por un sensor de presión. El sensor será colocado en la parte trasera del animal para determinar presiones en el sensor, y así poder detectar la monta respectiva.

## 4.2. Requerimientos del sistema

El dispositivo IoT debe cumplir los siguientes requisitos:

- Bajo consumo energético
- Alcance mínimo de 1km
- Adquisición de datos de los sensores de presión (*monta*) y del acelerómetro (*actividad física*)
- Almacenamiento y transmisión de los datos
- Obtener parámetros del estado del dispositivo, como la temperatura y humedad con fecha y hora de cada transmisión

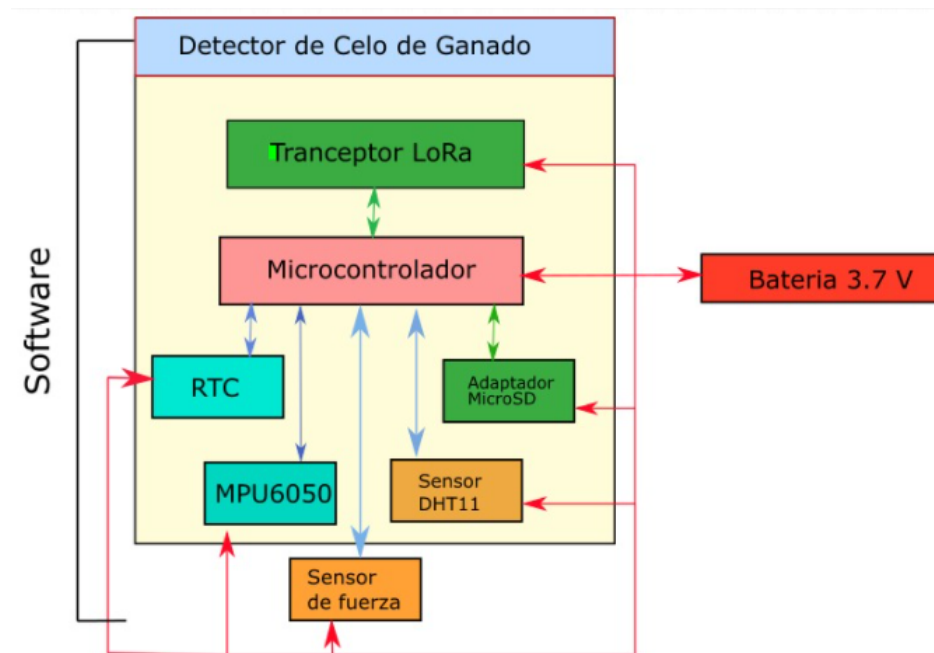


Figura 4.1: Diagrama de bloques del diseño para el prototipo IoT [30]

El diagrama de bloques del diseño para el prototipo se presenta en la Figura 4.1. El diagrama consta cada uno de los elementos y sus diferentes conexiones.



### 4.3. Descripción de los elementos utilizados

#### 4.3.1. Transceptor

En el prototipo se usó el módulo Ra-02 LoRa SX1278, trabaja a una frecuencia de 433MHz. Sus dimensiones son de 17\*16mm. Los transceptores SX1278 cuentan con un módulo de largo alcance y una inmunidad de alta interferencia mientras minimiza el consumo de corriente. Puede lograr una sensibilidad de más de -148dBm. Cuenta también con un amplificador de potencia integrado de +20dBm, esto lo hace óptimo para aplicaciones de alto rango. Como se observa en la Figura 4.2 el transceptor viene encapsulado para montaje superficial y con un pin para una antena de RF. El voltaje de alimentación es de 1.8 a 3.7v. Usa una comunicación SPI semi-duplex y velocidades de bits programables hasta 300kbps [22].



Figura 4.2: Transceptor Ra-02 [22]

Para el dispositivo IoT el transceptor LoRa es el encargado de transmitir los datos de los diferentes sensores conectados al microcontrolador, dicha transmisión se realiza a través de la antena de RF. La comunicación entre el transceptor y el microcontrolador es mediante SPI. Se usó el pin de RESET, cuya finalidad es arrancar el transceptor. Finalmente, se ocupan los pines de entrada o salida que son configurables por software (DIO 0-5). En la Figura 4.3 se presenta el diagrama de bloques del transceptor.

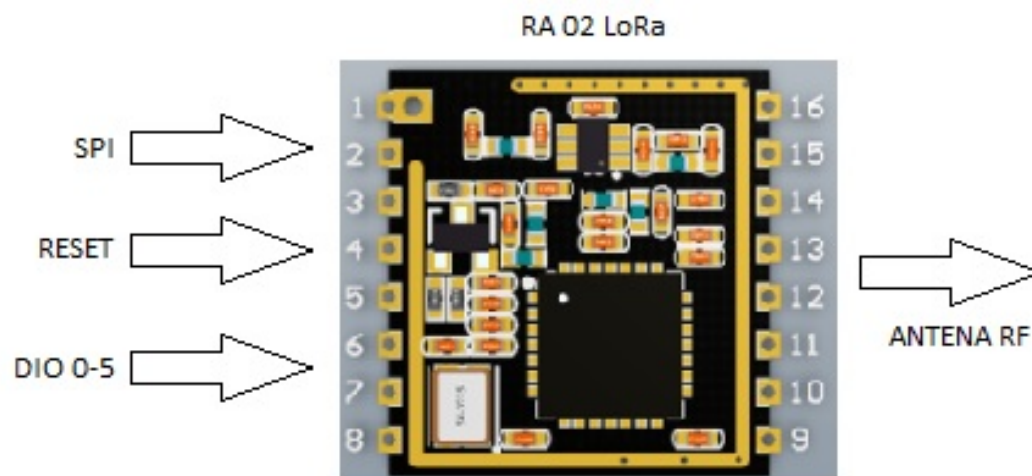


Figura 4.3: Diagrama de bloques del transceptor LoRa Ra-02

### 4.3.2. Microcontrolador

Para el dispositivo [IoT](#) se usó el microcontrolador ATmega1284p de montaje superficial (Figura 4.4). Se decidió usar este microcontrolador debido a sus características. A continuación se enumera sus características principales:

- Bajo consumo energético
- Microcontrolador de 8 bits de alto rendimiento
- SRAM interna de 16KBytes
- Programa y memorias de datos no volátil
- 128Kbytes de Flash autoprogramable

El microcontrolador se encarga de adquirir los datos de los sensores (presión, aceleraciones, temperatura, humedad), la memoria SD, el reloj y el control para el transceptor [LoRa](#).



Figura 4.4: Microcontrolador ATmega 1284p

El microcontrolador requiere un oscilador externo, el fabricante recomienda usar uno de 16MHz para un uso óptimo. En la Figura 4.5 se observa el diagrama de bloques de la conexión del ATmega.

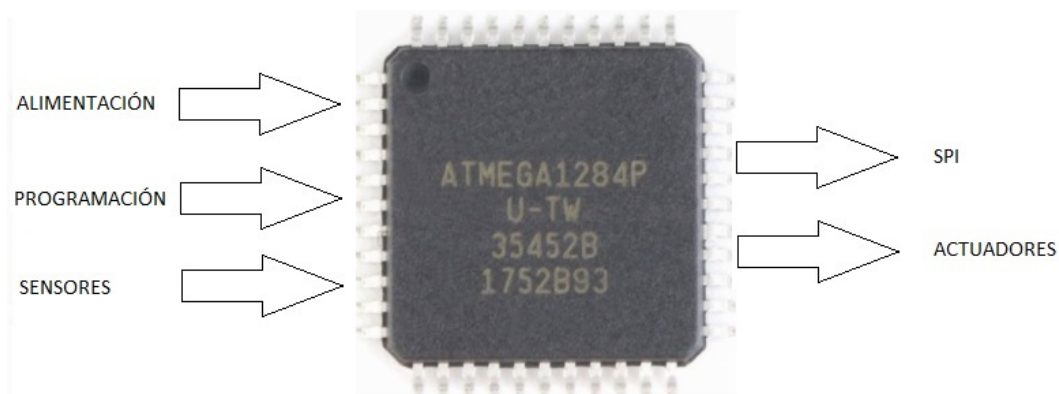


Figura 4.5: Diagrama de bloques del funcionamiento Microcontrolador en el dispositivo

### 4.3.3. Sensores

Los sensores son dispositivos capaces de detectar cambios en el entorno, dando valores representativos para su análisis. Un sensor transforma un fenómeno físico en un voltaje analógico o digital medible. El dispositivo de detección de celo cuenta con dos sensores que son el de fuerza, que detecta la monta y un acelerómetro que indica su actividad física. Por otro lado se tiene un sensor de humedad y temperatura para monitorizar el estado de la placa. A continuación se detalla cada sensor.

- **Sensor de temperatura y humedad**

Este sensor servirá para conocer el estado de la placa, para esto se ha escogido el sensor DHT11, ya que su ventaja principal es que es digital, esto lo hace un dispositivo de alta fiabilidad y estabilidad frente al ruido, lo que no pasa con elementos analógicos como el LM35. En la Figura 4.6 se observa su forma física. Los pines que utiliza el DHT11 son:

- GND: conexión con tierra
- DATA: transmisión de datos
- VCC: alimentación

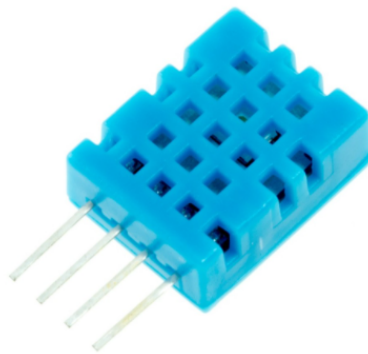


Figura 4.6: Sensor de temperatura y humedad

Su alimentación es de 3.5V a 5V y un consumo de 2.5mA. En lo que respecta al rango de medida en temperatura funciona de 0 a 50 grados y en humedad de 20 por ciento RH a 90 por ciento RH [32].

- **Acelerómetro**

Para la monitorización de la actividad física en el ganado, se utilizó el acelerómetro MPU6050 (Figura 4.7). El mismo fue seleccionado por su bajo consumo energético (45 $\mu$ A en la adquisición de datos y 0.1 $\mu$ A en *standby*). Opera entre voltajes de 2V a 3.6V. Este sensor es capaz de detectar la aceleración en tres ejes (x, y, z). Adicionalmente se puede determinar la orientación del sensor, por la acción de la gravedad. La manera de incorporar al microcontrolador para la lectura de datos es mediante la comunicación I2C. Cuenta también con un bloque de memoria FIFO que almacena hasta 32 conjuntos X, Y, Z.

El sensor tiene los pines de VCC y GND para la alimentación, y con los pines SDA y SCL para la comunicación con el microcontrolador. En este trabajo fue necesario especificar el registro de comunicación, dado que existen 2 sensores que utilizan este bus de datos.

- **Sensor de fuerza**

Para sensar la monta en la vaca se escogió el dispositivo Force Sensing Resistors (FSR) (Figura 4.8). Funciona como una resistencia variable con la fuerza aplicada en su parte activa. Esta parte es un elemento



Figura 4.7: Acelerómetro MPU6050

de una película delgada de polímero; a mayor fuerza aplicada más baja es su resistencia. Este sensor es de fácil manejo y bajo costo.



Figura 4.8: Sensor FSR

Un dato a tomar en cuenta es que este sensor, no es de precisión, pero para el caso del dispositivo solo se necesita detectar si hay o no una monta en el animal, por lo que es de utilidad.

En la Figura 4.9 se muestra el comportamiento típico del FSR, cuando la fuerza aumenta la resistencia baja. El valor de la resistencia decrece de manera lineal en función de la fuerza [33]; cuando se ejercen fuerzas pequeñas el comportamiento no es lineal.

- **Sensor de corriente**

Uno de los objetivos de esta investigación es realizar un estudio de consumo energético en el dispositivo IoT. Para este análisis se decidió emplear el módulo sensor de corriente INA219 que mide corriente continua hasta 3.2 A y voltaje hasta 26 voltios, utiliza una conexión I2C para la comunicación con

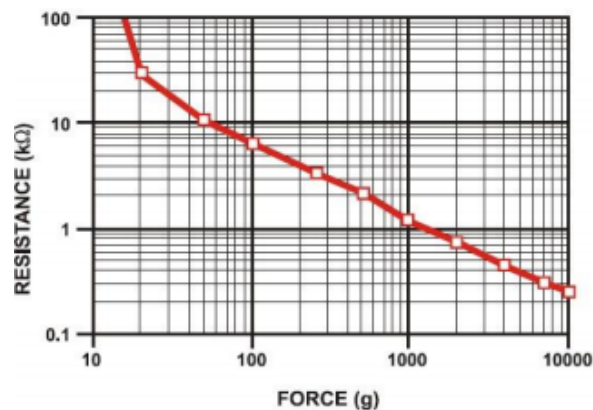


Figura 4.9: Gráfica de la resistencia en función de la fuerza [33]

el microcontrolador. Su forma física se observa en la Figura 4.10; a continuación se mencionan las características principales.

- Rango de Medición de Tensión: 0 a 26 V.
- Rango de Medición de Corriente: 0 a 3.2 A.
- Tensión de Alimentación: 3 a 5 V.

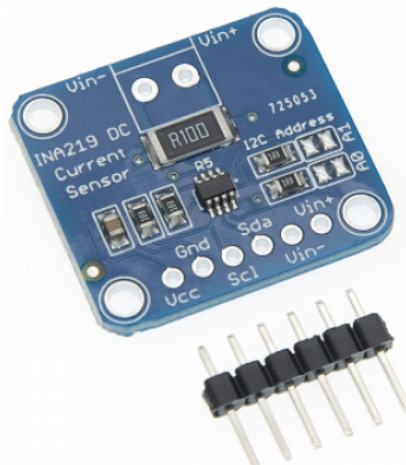


Figura 4.10: Sensor de corriente

#### 4.3.4. Reloj de tiempo real

En el prototipo se usará un reloj en tiempo real para que los datos obtenidos tengan su respectiva hora y fecha. Un reloj **Real Time Clock (RTC)** funcionan con un oscilador de cristal integrado para poder contabilizar de manera precisa el paso del tiempo. Hay que recalcar también que es un dispositivo de bajo consumo energético.

Para este proyecto se seleccionó el modelo DS3231 (véase la Figura 4.11), el cual garantiza una precisión mínima de 2ppm, lo que equivale a un retraso de un segundo cada 6 días. La comunicación de este reloj es a través del bus **I2C**. Funciona con una alimentación de 2.3V a 5V. También incorpora una batería CR2032 para que el reloj siga funcionando en caso de que el dispositivo principal este sin alimentación. El voltaje de

alimentación de la batería es de 2V a 5V. Hay que mencionar también que es un dispositivo de bajo costo.

El reloj utilizado mantiene la información de segundos, minutos, horas, día, mes y año. Tiene la capacidad de ajustarse para los meses con menos de 31 días. El RTC funciona con un formato de 24 horas o de 12 horas según como se lo configure.



Figura 4.11: Reloj en tiempo real DS3231

#### 4.3.5. Almacenamiento

Para almacenar la información se decidió usar una tarjeta SD (Figura 4.12). La lectura de datos se la realiza mediante comunicación [SPI](#), esto por su alta tasa de transferencia. La tensión de funcionamiento es de 3.3V a 5V. Las SD proporcionan una memoria prácticamente ilimitada al dispositivo. Este tipo de dispositivos de almacenamiento se puede conectar a un ordenador de forma sencilla y tener acceso a toda la información en la tarjeta.

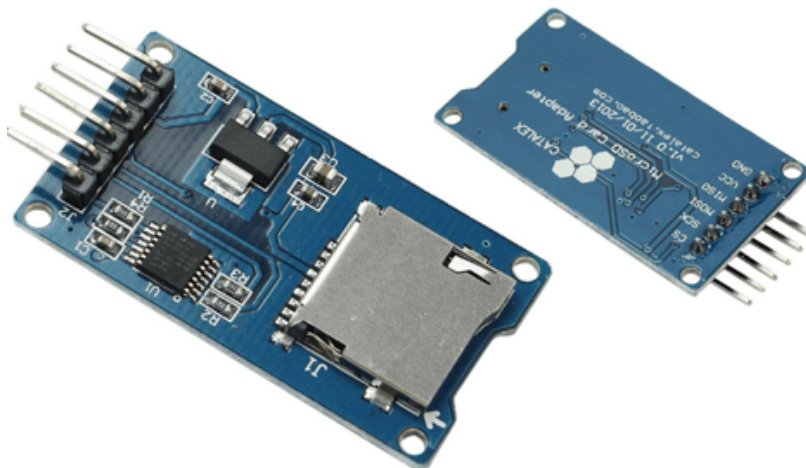


Figura 4.12: Lector de tarjetas SD

## 4.4. Comunicación entre dispositivos

Para la comunicación entre el microcontrolador y el lector de tarjetas SD y el transceptor se usará comunicación **SPI** (Sección 2.4). El microcontrolador actuará como maestro y los otros dos dispositivos como esclavos. Las conexiones de estos elementos se detallan en las Tablas 4.1 y 4.2

Tabla 4.1: Conexión utilizada para la comunicación entre el microcontrolador y el transceptor.

Descripción	Ra02 SX1278	ATmega 1284p
COMUNICACIÓN SPI	SCK	7
COMUNICACIÓN SPI	MISO	5
COMUNICACIÓN SPI	MOSI	6
COMUNICACIÓN SPI	NSS	4
CONTROL	NRESET	1
CONTROL	DIO0	13
CONTROL	DIO3	22
ALIMENTACIÓN	3.3V	3.3V
ALIMENTACIÓN	GND	GND

Tabla 4.2: Conexión utilizada para la comunicación entre el microcontrolador y el lector SD

Descripción	Lector SD	ATmega 1284p
COMUNICACIÓN SPI	SCK	7
COMUNICACIÓN SPI	MISO	5
COMUNICACIÓN SPI	MOSI	6
COMUNICACIÓN SPI	NSS	12
ALIMENTACIÓN	3.3V	3.3V
ALIMENTACIÓN	GND	GND

El protocolo **I2C** se utiliza para enlazar el microcontrolador con el **RTC** y el acelerómetro; las conexiones necesarias para ello se detallan en las Tablas 4.3 y 4.4.

Tabla 4.3: Conexión utilizada para la comunicación entre el microcontrolador y el RTC.

Descripción	RTC DS3231	ATmega 1284p
COMUNICACIÓN I2C	SCL	16
COMUNICACIÓN I2C	SCK	17
ALIMENTACIÓN	3.3V	3.3V
ALIMENTACIÓN	GND	GND



Tabla 4.4: Conexión utilizada para la comunicación entre el microcontrolador y el acelerómetro.

Descripción	MPU6050	ATmega 1284p
COMUNICACIÓN I2C	SCL	16
COMUNICACIÓN I2C	SCK	17
CONTROL	AD0	3.3V
ALIMENTACIÓN	3.3V	3.3V
ALIMENTACIÓN	GND	GND

## 4.5. Arquitectura del dispositivo

En la Figura 4.13, se muestra el diagrama de bloques de la arquitectura dispositivo IoT para la detección de celo en ganado bovino. Este diagrama contiene los bloques principales para su funcionamiento. En la parte izquierda del diagrama se tiene la antena RF, la misma que propaga la información en la banda de 433Mhz. El LoRa SX1278 es el encargado de la transmisión hacia la antena RF. El Atmega1284 contiene toda la lógica de programación. Finalmente, se tiene el RTC y el lector SD.

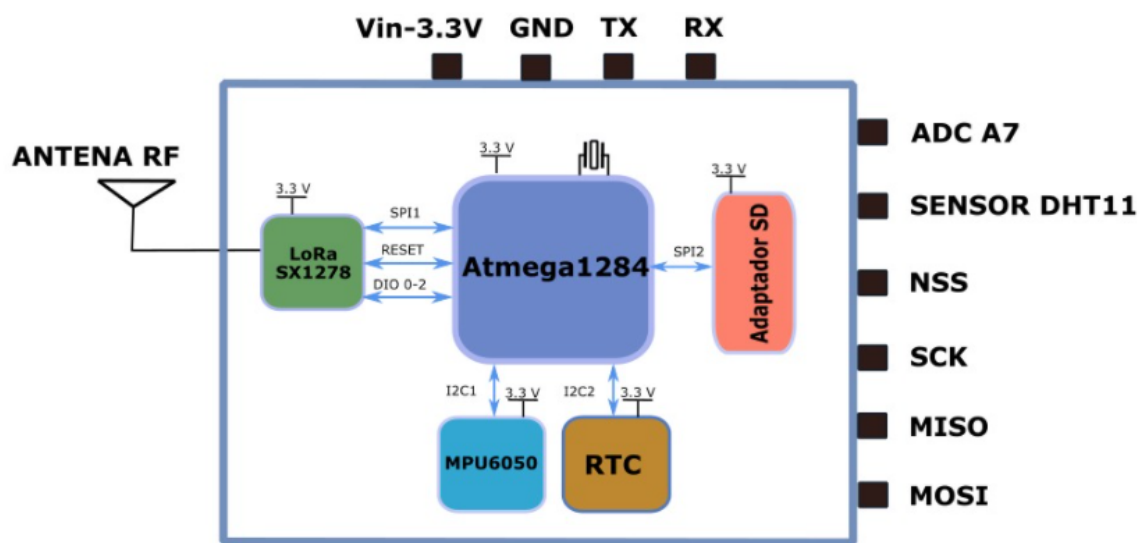


Figura 4.13: Diagrama de bloques del diseño del prototipo

Para el diseño y desarrollo de la placa se utilizó el programa Altium Designer. En el programa se realizó un circuito esquemático con las conexiones entre los diferentes elementos. Además de las diferentes conexiones se dispuso de un puerto SPI para cargar los programas al microcontrolador y un puerto serial para observar los datos procesados. A partir del circuito esquemático se generó el circuito impreso (Figura 4.14).



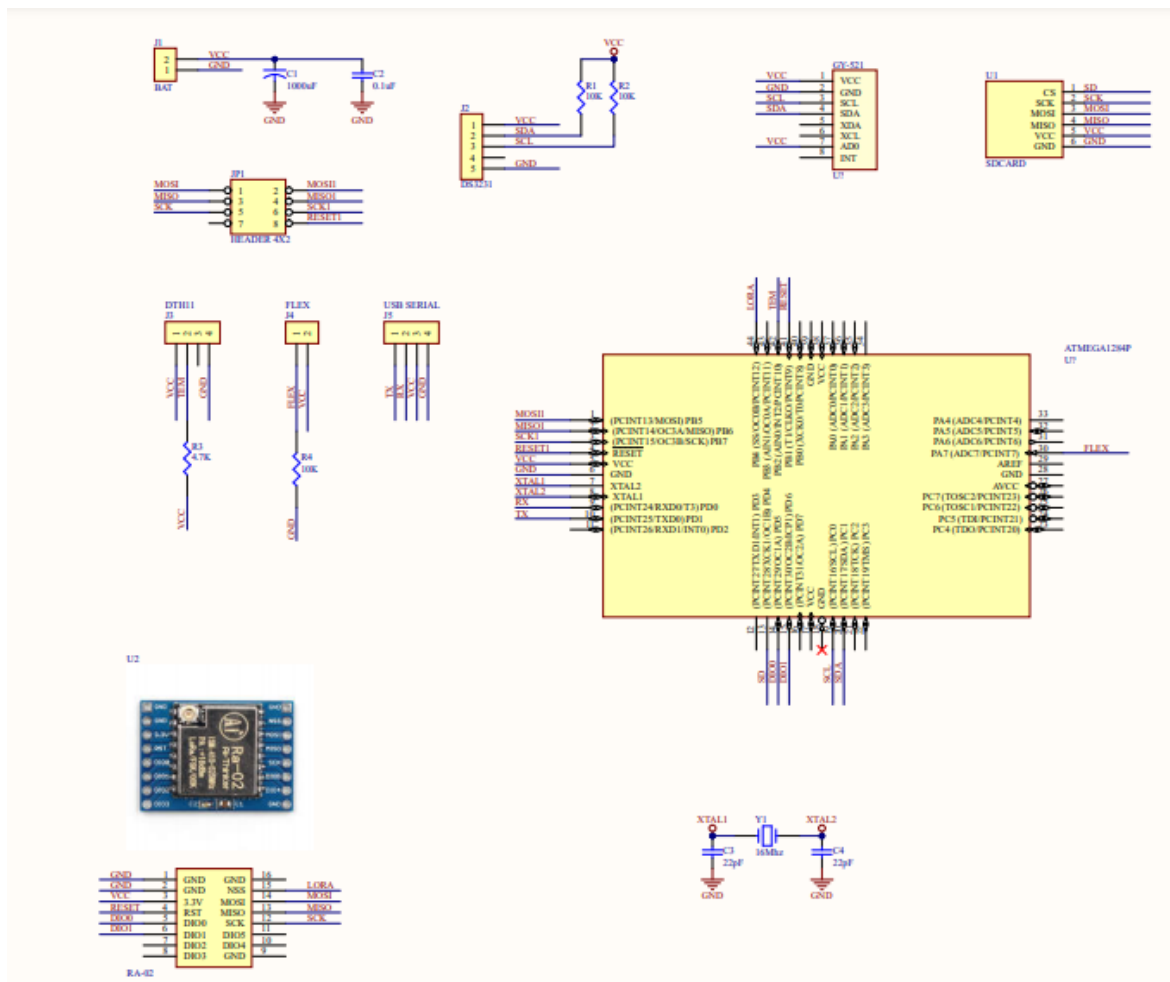


Figura 4.14: Diseño del circuito esquemático

## 4.6. Placa de circuito impreso (PCB)

En esta sección se describe el desarrollo de la placa tanto para el nodo como para el Gateway. Las placas realizadas tienen tecnología de montaje superficial, que es el método de construcción de dispositivos más utilizado actualmente

### 4.6.1. Placa de circuito impreso (PCB) para el nodo

El dispositivo se diseñó de tal manera que pueda ser lo más pequeño posible, las dimensiones finales son de  $60 \times 40$  mm, las pistas de conexión tienen un grosor de 0.35 mm y las de alimentación de 0.5 mm. El microcontrolador se lo colocó en el medio de la placa ya que es el elemento que tiene conexión con todos los dispositivos, así se reduce el tamaño de las pistas y los efectos parásitos resistivos e inductivos. En la Figura 4.15 se muestra el ruteo de la cara superior, y en la Figura 4.16 se ve el resultado final de de la misma cara en la cual muestra todas las huellas de los componentes, las pistas y pines respectivos.

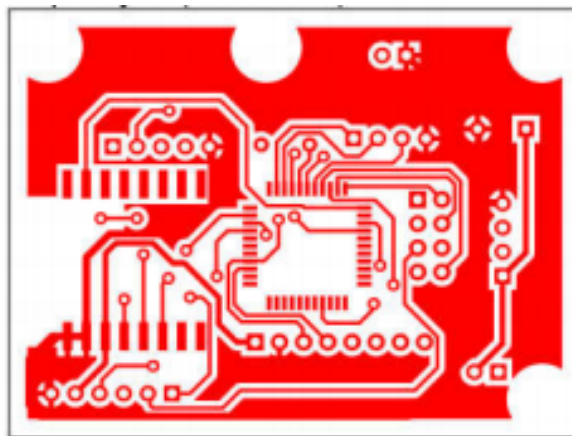


Figura 4.15: Diseño en 2D de la cara superior

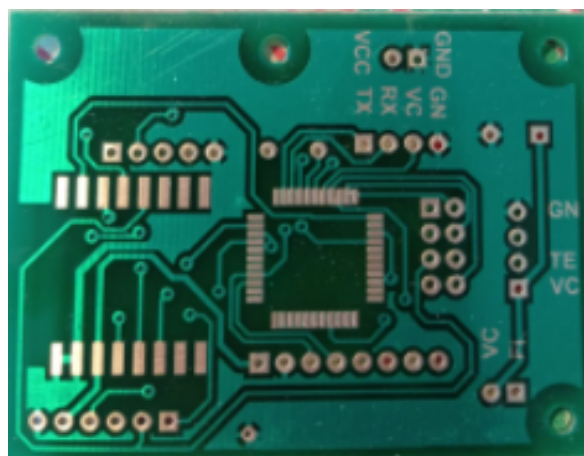


Figura 4.16: Placa impresa de la cara superior

En las Figuras 4.17 y 4.18 se muestra la cara inferior en 2D y la impresión final de la cara inferior de la placa, respectivamente.

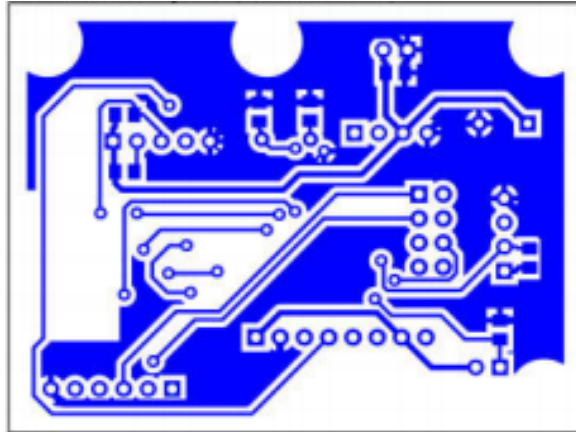


Figura 4.17: Diseño en 2D de la cara inferior

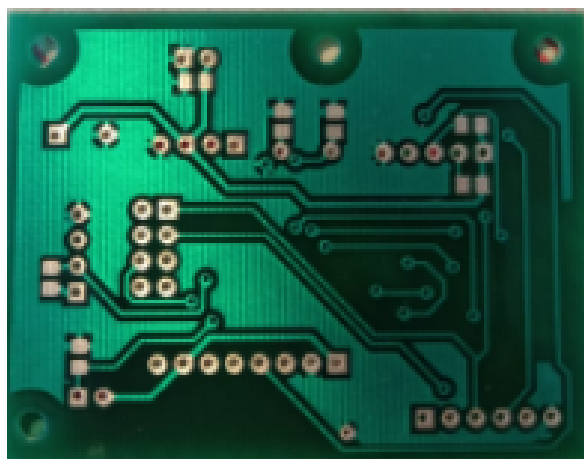


Figura 4.18: Placa impresa de la cara inferior

En las Figuras 4.19 y 4.20 se muestra el diseño PCB del prototipo final en 3D y la vista superior de la placa respectivamente. En estas imágenes se puede observar la placa final con cada uno de los elementos que la conforma.

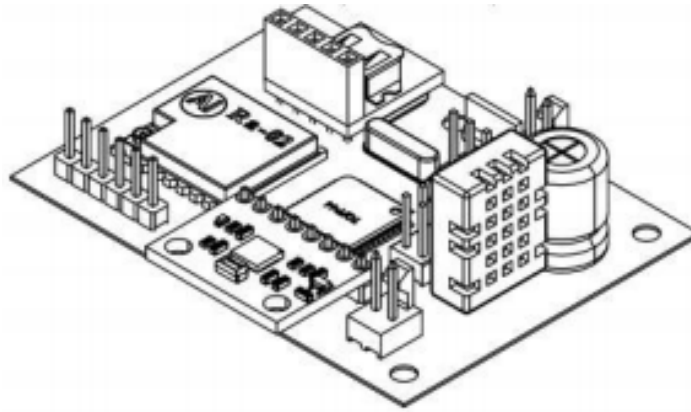


Figura 4.19: Diseño en 3d de la placa PCB

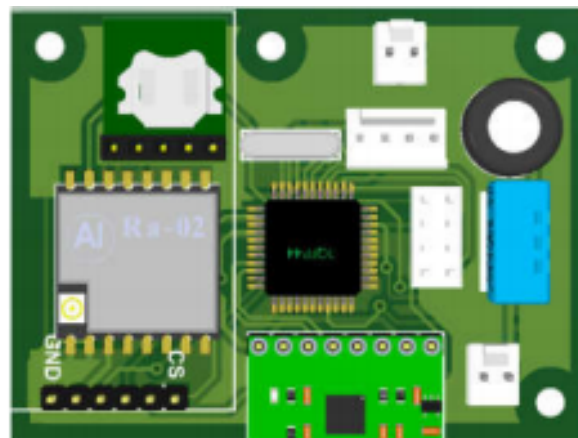


Figura 4.20: Vista superior de la placa PCB

#### 4.6.2. Placa de circuito impreso (PCB) para el Gateway

Se procedió a diseñar las conexiones entre el transceptor [LoRa](#) y la Raspberry Pi 3B+, siendo el bus de datos [SPI](#), los pines de control y los pines de alimentación. En la Figura 4.21 se muestra el diseño del circuito esquemático para el Gateway

El Gateway solo cuenta con el transceptor [LoRa](#). Esta placa irá conectada a la Raspberry pi 3B+ para hacerle más compacto. En la Figura 4.22a se observa el diseño final de la placa. En la Figura 4.22b se aprecia ya la placa terminada para el Gateway. Finalmente, en la Figura 4.22c se puede apreciar el acoplamiento de la placa al nodo.

En la Figura 4.22b se aprecia la placa terminada para el Gateway.

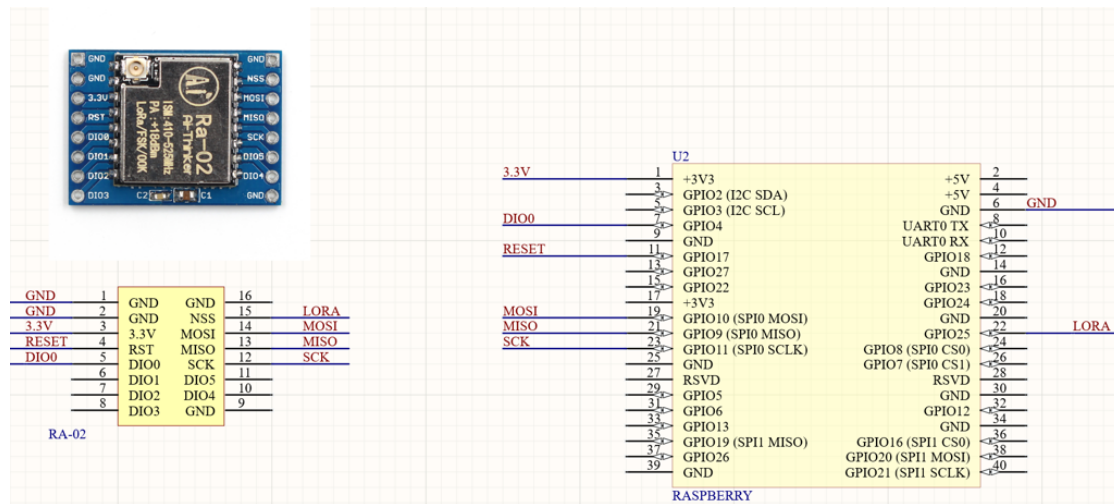
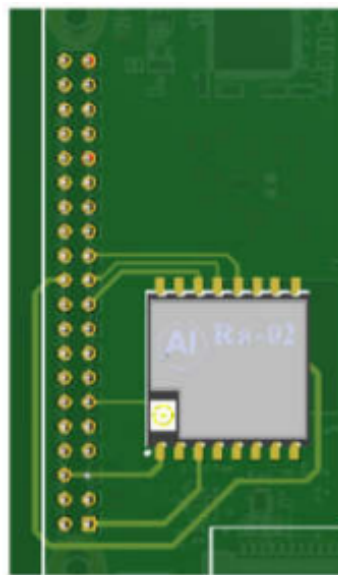
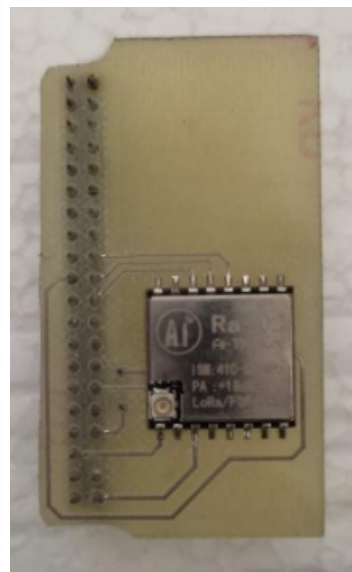


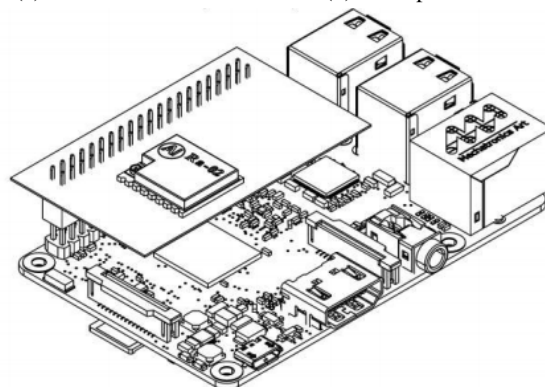
Figura 4.21: Diseño final del circuito esquemático para el Gateway



(a) Diseño final



(b) Placa para el Gateway



(c) Vista previa del acoplamiento de la placa a la Raspberry pi

Figura 4.22: Diseño y armado del Gateway

## 4.7. Aplicación del protocolo LoRaWan

**LoRaWAN** es un protocolo de comunicación y arquitectura del sistema para la red, consiste en tres componentes principales que son:

- Servidores de red
- Gateway
- Nodos finales

Desde el punto de vista de la arquitectura, los nodos finales se encargan en adquirir los datos de la actividad de la vaca, para ser transferidos al Gateway mediante la modulación **LoRa**, a su vez el Gateway se comunicará con los servidores de red, como se observa en la Figura 4.23. Mientras que la capa física **LoRa** habilita el enlace de comunicación de largo alcance.

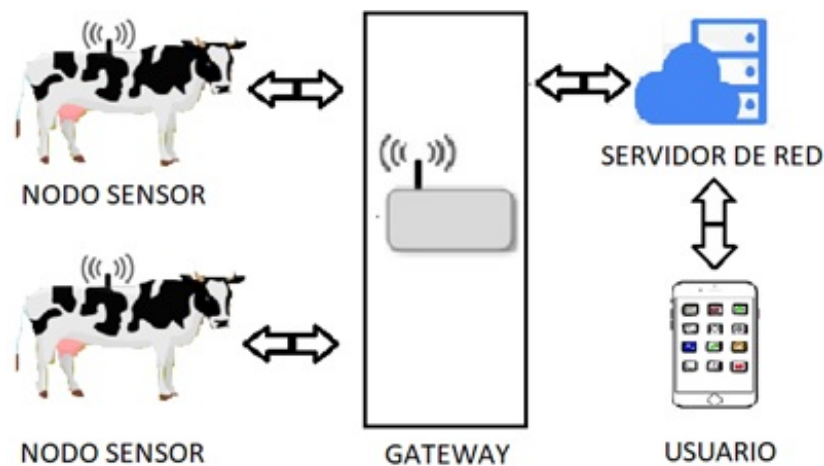


Figura 4.23: Arquitectura de la red LoRaWAN

**LoRaWAN** es un protocolo de capa **MAC**; su objetivo es resolver problemas de gestión del medio y congestión de la red. Un sistema con este protocolo tiene ahorros considerables en la implementación y en infraestructura en comparación con sistemas existentes [34].

### 4.7.1. Nodo final LoRa

Los nodos finales son los dispositivos que tienen como finalidad enviar y recibir información del Gateway; estos pueden estar fijos o móviles mientras recolectan información. En este caso de estudio el nodo estará colocado en la vaca con la ayuda de un chaleco. En la Figura 4.24 se muestra el prototipo **PBC** del nodo final. El mismo cuenta con un transceptor **LoRa**, sensores, baterías de alimentación, memoria externa, un microcontrolador y una antena RF.

El nodo usa el método de activación **ABP** en la configuración de la red **LoRaWAN**. En este caso, tanto las claves de sesión como la dirección física del nodo son conocidas por nodo y el servidor. Para usar este método de activación se necesita de la **DevAddr** (dirección del nodo), también es necesario la clave de sesión de aplicación (**AppSKey**), y por último, la clave de sesión de la red (**NwSKey**). Todos estos valores mencionados deben estar configurados tanto en el programa del microcontrolador como en el servidor para llevar a cabo el proceso de autenticación. En la Figura 4.25 se observa el proceso de agregación de nodos a la red.



Figura 4.24: Nodo final- Detector de celo en ganado bovino

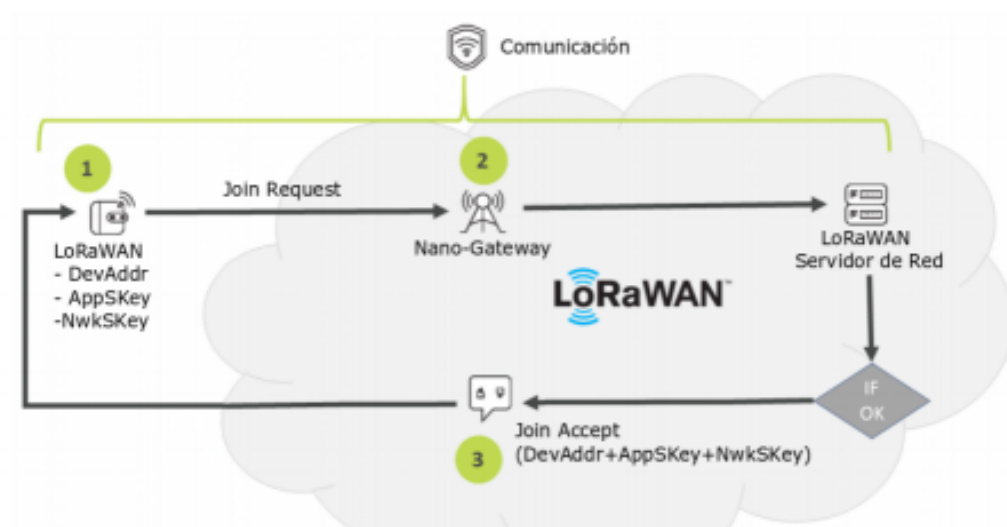


Figura 4.25: Agregación de nodos



### 4.7.2. LoRa Gateway

En una red **LoRaWAN**, un Gateway es un dispositivo que recibe los datos transmitidos por un nodo final y que a su vez reenvía los paquetes de datos a un servidor de red. El Gateway en este caso se construyó con una Raspberry Pi 3 B+. Esta funciona con reenviadores de paquetes que pueden ser instalados en Raspbian que es el sistema operativo que maneja el equipo. La comunicación entre la Raspberry y el transceptor **LoRa** se la realiza usando **SPI**. La conexión de los pines se detalla en la Tabla 4.5. En la Figura 4.26 se observa el Gateway que recibirá los datos del nodo.



Figura 4.26: LoRa y Raspberry Pi 3B+ conectados

Tabla 4.5: Conexión utilizada para la comunicación entre Raspberry Pi y Ra02 SX1278.

Descripción	Ra02 SX1278	Raspberry pi
COMUNICACIÓN SPI	SCK	23
COMUNICACIÓN SPI	MISO	21
COMUNICACIÓN SPI	MOSI	19
COMUNICACIÓN SPI	NSS	22
CONTROL	RESET	11
CONTROL	DIO0	7
ALIMENTACIÓN	3.3	1
ALIMENTACIÓN	GND	6

#### 4.7.2.1. Reenviadores de paquetes

El programa reenviador de paquetes se ejecuta en el Gateway **LoRa** y tiene como finalidad reenviar los paquetes recibidos por el concentrador al servidor de red, a través de protocolos IP/UDP y el puerto 1700. En el



caso de este trabajo se decidió usar el reenviador de paquetes “*Single Channel Packet Forwarder*” [35].

#### 4.7.2.2. ChirpStack

La pila del servidor de red *ChirpStack LoRaWAN* proporciona componentes de código abierto para redes *LoRaWAN*. Este servidor está constituido por el puente de puerta de enlace, el servidor de red y servidor de aplicación. ChirpStack permite tener un servidor *LoRa* en una red local para la administración de dispositivos de forma gratuita. Todos los componentes están sujetos a la licencia MIT y pueden utilizarse con fines comerciales.

#### 4.7.2.3. Puente de puerta de enlace ChirpStack

El puente de puerta de enlace de ChirpStack conecta el reenviador de paquetes y el servidor de MQTT. Transforma el formato del reenviador de paquetes en un formato utilizado por los componentes ChirpStack. También proporciona integraciones con varias plataformas en la nube como *GCP Cloud IoT Core* y *Azure IoT Hub*.

#### 4.7.2.4. Servidor de red ChirpStack

Es un servidor *LoRaWAN*, encargado de administrar el estado de la red, conoce la activación de cada dispositivo, además administra las solicitudes de unión de dispositivos que desean integrarse a la red; otras responsabilidades de este servidor son:

- Autenticación
- *LoRaWAN* mac-layer (y mac-commands)
- Comunicación con el servidor de aplicaciones
- Programación de tramas de enlace descendente

#### 4.7.2.5. Servidor de aplicación

El servidor de aplicación es un servidor *LoRaWAN* de código abierto *ChirpStack*; su función es gestionar los dispositivos en una infraestructura *LoRaWAN*. Cuenta con interfaz web y API en la cual se pueden administrar usuarios, aplicaciones y dispositivos. Se puede programar la carga útil a recibir para ubicarla en variables deseadas. En la Figura 4.27 se aprecia la interfaz gráfica del *Application Server ChirpStack*.

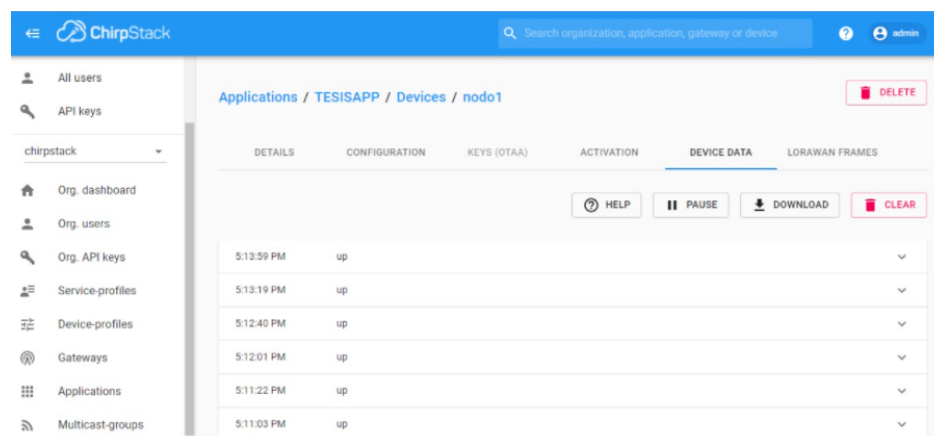


Figura 4.27: Interfaz gráfica del Application Server

## 4.8. Estructura de la trama física

Para generar la trama física se procedió a analizar la cantidad de valores necesarios para cada variable. La granja cuenta con 47 cabezas de ganado registradas. Este valor cabe dentro de los 255 valores posible de 8 bits, pero dado que en los aretes el registro de los animales se realiza con valores que sobrepasan el byte, se optó que la variable identificadora “*CownID*” de cada vaca sea 16 bits. La siguiente variable es “*Epoch*” que es la hora en formato Unix; esta tiene una dimensión de 32 bits. La tercera variable es “*Steps*” que son los pasos medidos en el periodo de una hora, su longitud es de 10 bits dado que experimentalmente la vaca llega a caminar como máximo hasta un aproximado de 900 pasos en este periodo de tiempo. La siguiente variable es “*Monta*” con 7 bits, debido a que las montas no sobrepasarán las 100 unidades. La temperatura y la humedad están ubicadas en las variables “*Temp*” y “*Hum*” respectivamente su objetivo es monitorear el estado del dispositivo; tienen 7 bits de longitud porque el rango de medición de la temperatura y la humedad no sobrepasará las 100 unidades que caben en 7 bits puesto que no se usará precisión decimal. La trama finaliza con la variable “*Alert*”, la cual es el aviso de celo; esta tendrá un valor de 1 cuando sea un posible celo o 0 cuando no este en celo. En la Figura 4.28 se observa el diseño de la trama física [36].

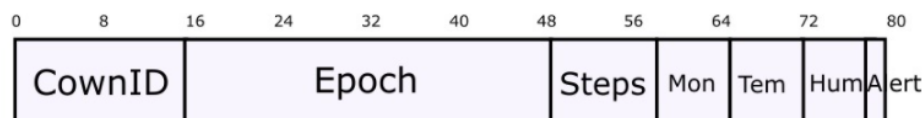


Figura 4.28: Diseño para el envío de la trama de datos

## 4.9. Aplicativo móvil

Para la implementación de la aplicación móvil se usa el entorno de desarrollo *Android Studio*. La aplicación filtra los paquetes por el puerto UDP 1883 que es utilizado por [Message Queue Telemetry Transport \(MQTT\)](#).

En la Figura 4.29 se muestra el diagrama de flujo para la realización del aplicativo móvil. Para iniciar la App se introduce la dirección IP del Gateway el cual se ha configurado como una IP fija, es importante mencionar que la conexión del aplicativo móvil es a la red local, donde se encuentra conectado el Gateway. Después se importa el dato del puerto [MQTT](#) 1883 y se introduce la identificación de la vaca que se desea monitorizar. Finalmente, se obtienen las diferentes variables del animal, como son pasos, monta, alerta. En la Figura 4.30 presenta la interfaz gráfica del aplicativo móvil para el usuario final, con los diferentes parámetros a monitorear, así mismo la aplicación enviará una notificación cuando el animal está en un posible celo.

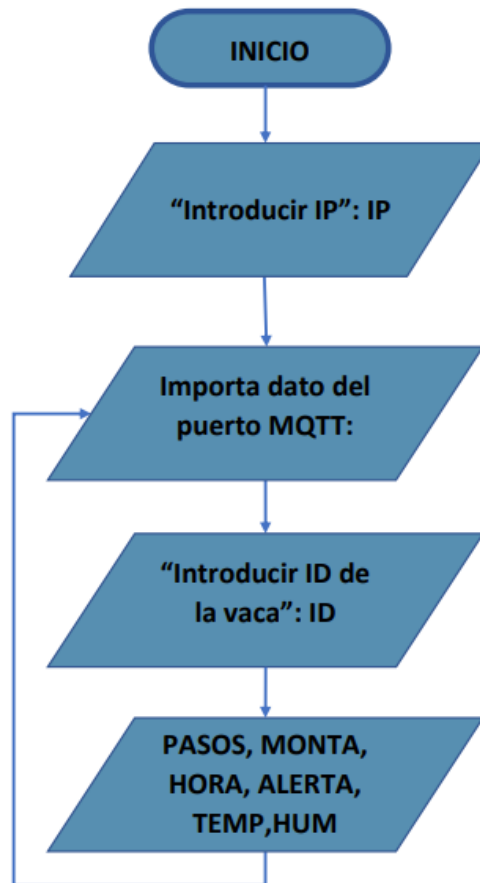


Figura 4.29: Diagrama de flujo para el aplicativo móvil



Figura 4.30: Interfaz gráfica de la aplicación

## 4.10. Adquisición de variables

En esta sección se describen los diferentes procesos que se llevaron a cabo para adquirir y procesar la actividad física, las montas y la detección de celo.

- **Cálculo de la actividad física en el ganado bovino**

En la Figura 4.31 se detalla el diagrama de flujo del algoritmo utilizado para el cálculo de la actividad física en el ganado bovino. Como datos de las variables de entrada se tiene las aceleraciones en los tres ejes, representados con las variables *AclX*, *AclY* y *AclZ*. Una vez con estos valores se procede a calcular el módulo resultante de estas aceleraciones. Dicho resultado se guarda en la variable *MAI*. Después entra a un proceso de decisión, en donde se encuentran umbrales *UmbX*, *UmbY*, *UmbZ* y *UmBAI*, que son los umbrales en los tres ejes y el umbral del módulo de la aceleración respectivamente; es importante mencionar que estos umbrales fueron determinados experimentalmente.

Entonces para determinar si la vaca dio un paso debe cumplir con una de las siguientes dos condiciones; la primera es que *AclY* debe ser mayor a *UmbY*, lo que significa que la aceleración en el sentido del movimiento del animal debe ser mayor que un umbral definido empíricamente, y *AclZ* mayor a *UmbZ*, con esto se garantiza que el movimiento es debido a un paso y no a una inclinación. La segunda condición es que *MAI* debe ser mayor a *UmBAI* y *AclX* menor a *UmbX*, esto significa que hubo un aumento en el módulo de la aceleración instantánea debido a un movimiento en el sentido en el que camina el animal, los umbrales para esta condición también fueron definidos empíricamente. Si cumple con algunas de las condiciones mencionadas, entonces el valor de pasos aumenta en uno y vuelve a repetir el algoritmo, caso contrario solo vuelve a repetir el proceso.

- **Detección de montas en el ganado bovino**

Como se menciona en el Capítulo 3, uno de los parámetros que ayuda a la detección del celo es la monta, ya que la vaca entra en un estado de bisexualidad, por lo que solicita ser montada. En la Figura 4.32 se observa el diagrama de flujo del algoritmo que se usa para la detección de este evento.

El algoritmo empieza leyendo el valor obtenido por el sensor de presión llamado *Peso* y un umbral de presión denominado *UmPre*, y por último, el valor de la *Monta*.

Para determinar si la vaca es montada, se hace uso del valor del sensor de presión (*Peso*), si dicho valor es mayor al del umbral colocado (*UmPre*) la variable de monta aumentará en uno. Después de esto el algoritmo se vuelve a repetir.

- **Detección de celo en ganado bovino**

Una vez obtenidos los valores de la monta y la actividad física, se procede a determinar el estado del celo en el ganado bovino. En la Figura 4.33 se observa el diagrama de flujo para este proceso. Como primer paso se define las variables de entrada *Monta* y *Pasos*, que son variables obtenidas del animal. La variable *UmPa* es un umbral de pasos, que ha sido definida analizando el comportamiento de la vaca cuando esta y no esta en celo. Por otro lado, se tiene variables de tiempo como es la hora, día, hora actual, día actual, representados por *Hora*, *Día*, *Hact*, *Dact*, respectivamente. Por último, se definen dos contadores uno de horas y otro de días, definidos como *contH* y *D*, respectivamente.

El siguiente paso a realizar es que si la variable *Monta* es mayor a cero, la variable *alerta* tomará el valor de 1, esto significa que la vaca está en un posible celo. Si la variable *Monta* es igual a cero, significa que el animal no solicitó la monta y tampoco a montado. Entonces, se verificará su actividad física, si la variable *Pasos* es mayor al umbral de pasos (*UmPa*) durante cuatro horas de un día, y esto pasa en tres días consecutivos el valor de alerta tomará el valor de 1, lo que significará un posible celo.

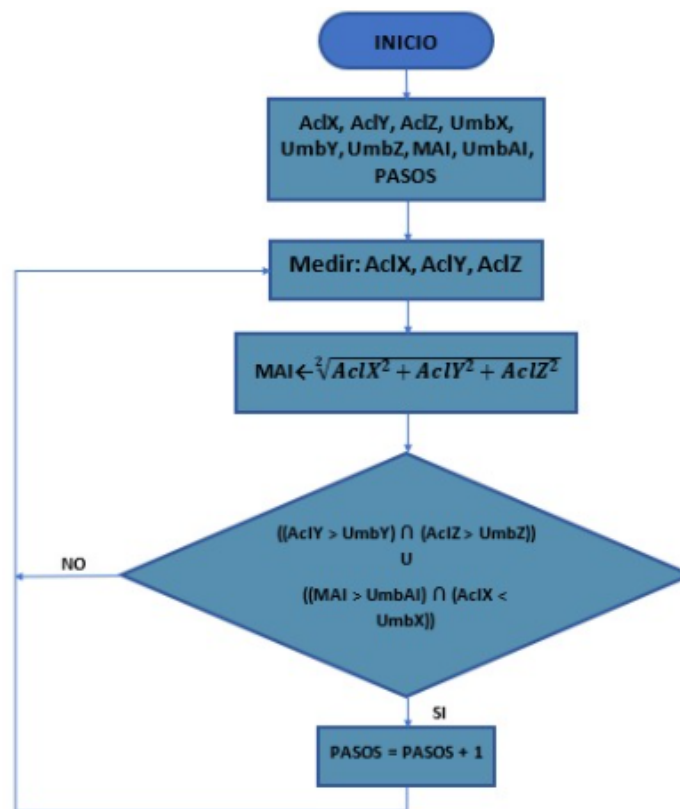


Figura 4.31: Diagrama de flujo para el cálculo de la actividad física en el ganado bovino

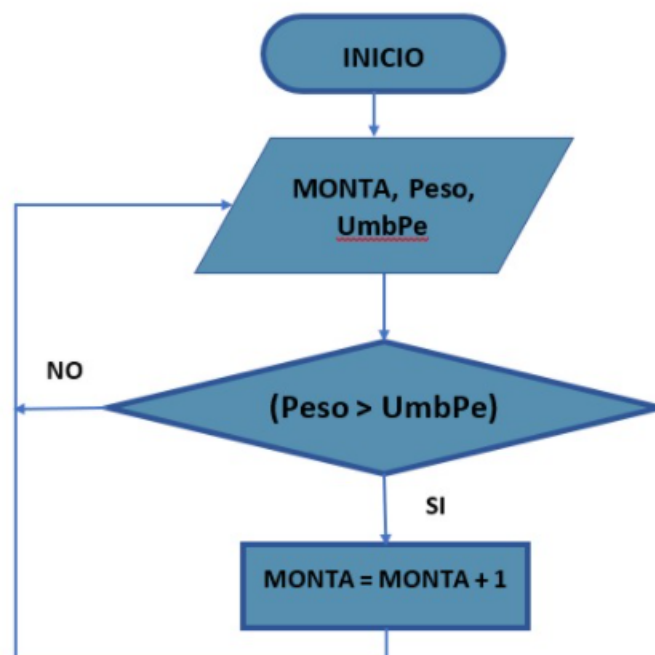


Figura 4.32: Diagrama de flujo para el cálculo de la monta en el ganado bovino

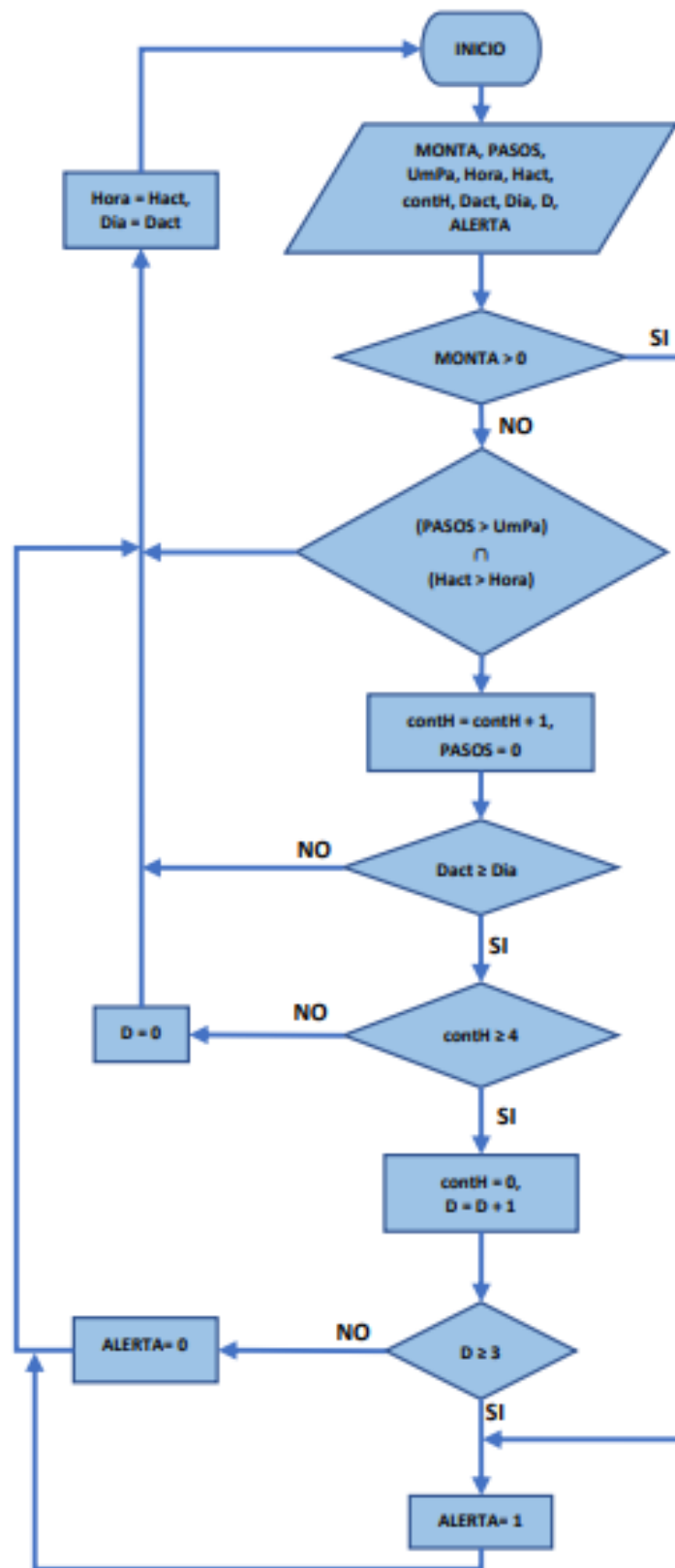


Figura 4.33: Diagrama de flujo la detección de celo en ganado bovino

## 4.11. Contenedor para los dispositivos

En esta sección se describirá el contenedor tanto del nodo como del Gateway. Los dos dispositivos estarán a la intemperie por lo que necesitan de ciertas propiedades para su correcto funcionamiento. Se busca evitar el contacto con agentes externos y medioambientales, tales como la lluvia, el polvo o la humedad.

### 4.11.1. Contenedor para el nodo

Se buscó un contenedor capaz de proteger el nodo, por lo que se usó una caja que cumple con el protocolo [Ingress Protection 65 \(IP65\)](#), esto significa que dicho contenedor ofrece protección contra partículas y el agua por su hermeticidad, sus dimensiones son de  $10 \times 10 \times 15$  cm. De esta forma el único elemento expuesto al ambiente es la antena RF, como se muestra en las Figuras [4.34](#) y [4.35](#)



Figura 4.34: Contenedor para el nodo

Para colocar el nodo en la vaca y realizar la respectiva monitorización del animal, se usó un chaleco con dos compartimientos el primero para colocar el contenedor y el segundo para colocar el sensor de presión. Esto se observa en la Figura [4.36](#).

### 4.11.2. Contenedor para el Gateway

De la misma forma el Gateway se colocará en un poste de alumbrado eléctrico (véase la Figura [5.2](#)), por lo que estará a la intemperie y necesita un contenedor para protegerlo. Para ello se utilizó una caja que cumple con el protocolo [IP65](#) y sus medidas son  $20 \times 7 \times 10$  cm, en las Figuras [4.37](#) y [4.38](#) se puede apreciar el Gateway en el contenedor.





Figura 4.35: Contenedor para el nodo

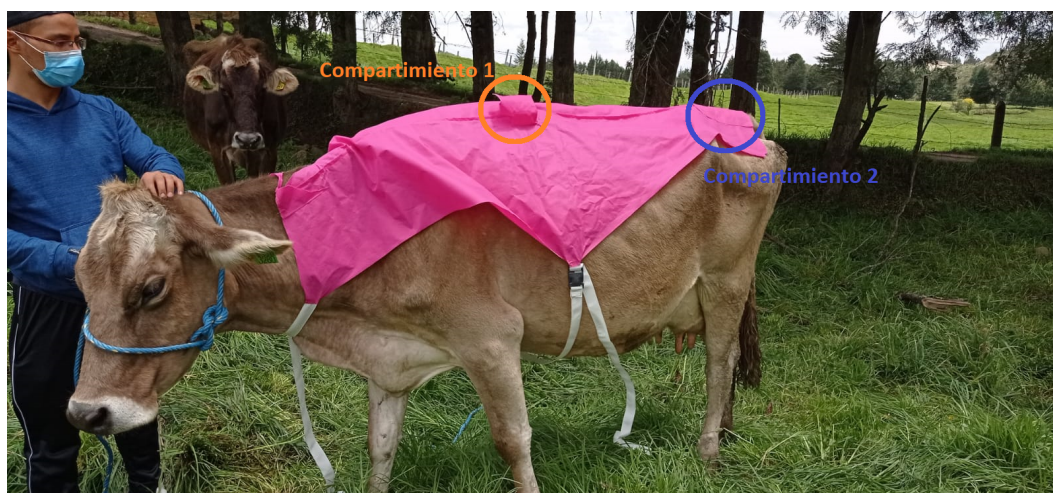


Figura 4.36: Chaleco colocado a la vaca





Figura 4.37: Contenedor para el Gateway



Figura 4.38: Contenedor para el Gateway



---

## Resultados

En este capítulo se describen los resultados obtenidos durante el diseño, construcción y pruebas del prototipo. Se detallará el funcionamiento final del dispositivo y los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas tanto en adquisición como en transmisión de datos. Primero se menciona un estudio del consumo energético (Sección 5.1). Se presenta las pruebas de alcance realizadas entre el nodo y el Gateway (Sección 5.2). Además, se detalla las pruebas del comportamiento en uno de los animales del ganado (Sección 5.3). Finalmente, Se realizan las pruebas para la detección del celo en diferentes vacas (Sección 5.4).

### 5.1. Consumo energético

El prototipo para la detección de ganado bovino tiene como objetivo ser un dispositivo de bajo consumo energético, ya que estará colocado en vacas. Para ello se ocupó baterías y dispositivos de bajo consumo. Se debe mencionar que el nodo permanecerá encendido todo el tiempo ya que cuando no realiza la transmisión esta monitorizando el comportamiento del animal. Entonces, por lo mencionado es fundamental realizar un estudio energético y así dimensionar la fuente de alimentación. Para hacer el análisis del consumo energético en el nodo se utilizó como fuente de alimentación una batería de 3.3v y 1200mA y con la ayuda del sensor de corriente especificado en la Sección 4.3, se muestreó la batería de forma constante tomando valores cada tres minutos como sugieren los autores de [37]. Los valores obtenidos se observan en la Figura 5.1.

Los picos de corriente con un valor promedio de 100mA son las transmisiones que realiza el dispositivo cada 3 horas. Cuando no hay transmisiones, la corriente consumida es aproximadamente 50mA. También se puede observar que la batería se agota en 1500 minutos, por lo que la batería tiene una duración de 25 horas. Ahora con los valores obtenidos del consumo energético se procedió a calcular un valor promedio que da como resultado 55mA, si al valor nominal de la batería que es 1200mA lo dividimos para este valor promedio dará como resultado 24 horas de duración, este sería un valor teórico que es similar al valor experimental que se obtuvo.

Para las pruebas en campo se armó un banco de 3 baterías de 1000mA de 3.3 V es decir una fuente de 3000 mA de 3.3 V. Esta fuente tiene una autonomía de 58 horas.

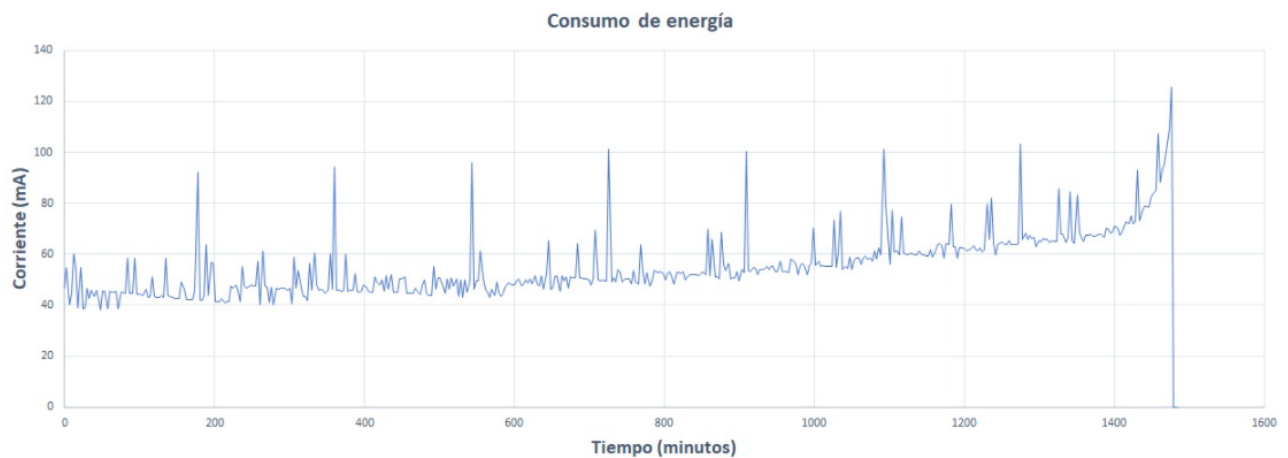


Figura 5.1: Gráfica del consumo energético de nodo

## 5.2. Pruebas de alcance

Para poder realizar las pruebas de alcance, se colocó el Gateway en una zona central de la granja y lo suficientemente alto para tener línea de vista con los diferentes potreros donde rotan las vacas, como se observa en la Figura 5.2. Para la transmisión de datos el nodo fue colocado en diferentes puntos de la granja, priorizando las áreas donde pasan los animales. Con varias pruebas realizadas la configuración que brindó mayor alcance y estabilidad fue la siguiente:

- Frecuencia: 433Mhz
- Factor de ensanchamiento: 12
- Ancho de banda: 125KHz
- Tasa de codificación: 4/5
- Potencia de transmisión: 20dB

Para un mayor alcance y robustez a la pérdida de datos, el transmisor se configuró con un factor de ensanchamiento de 12, un ancho de banda de 125KHz y una potencia de transmisión de 20dBm. Con la tasa de codificación 4/5 se asegura la fiabilidad de los datos; se refiere a fiabilidad de datos a la capacidad de recuperarlos sin errores. Con todo lo mencionado anteriormente se realizaron las pruebas en los diferentes potreros de la granja para verificar el alcance. A continuación se describe dicho proceso a tres distancias diferentes.

El Gateway que receptorá los datos está situado en las coordenadas que se indica en la Tabla 5.1. Para la primera prueba se seleccionó el potrero más lejano con punto de referencia A, en el cual se situó el nodo encargado de enviar los datos. Para la segunda prueba se seleccionó un potrero medianamente lejano de referencia B. Para la tercera prueba se salió de los linderos de la granja, esto con la finalidad de comprobar que el dispositivo funcione a mínimo 1 km de distancia. Los puntos de referencia se colocaron en las coordenadas que se indica en la Tabla 5.1.

Con los tres puntos de referencia seleccionados en la granja, se calcula la distancia entre el punto del Gateway y de referencia ya sea A, B o C; con la ayuda de la Ecuación 5.1 [38].

$$D = 6378 * \cos^{-1} * [\sin X_t * \sin X_r * \cos X_t * \cos X_r * \cos (Y_r - Y_t)] \quad (5.1)$$

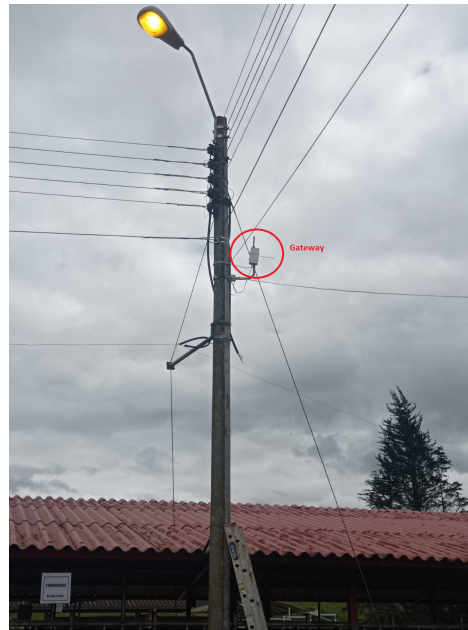


Figura 5.2: Ubicación del Gateway

Coordenadas	Gateway	Punta A	Punto B	Punto c
<b>Latitud</b>	3° 4'48.11" S	3° 4'54.49" S	3° 4'47.89" S	3° 5'17.10" S
<b>Longitud</b>	79°4'31.83" W	79° 4'35.94" W	79°4'44.84"W	79°4'48.10"W

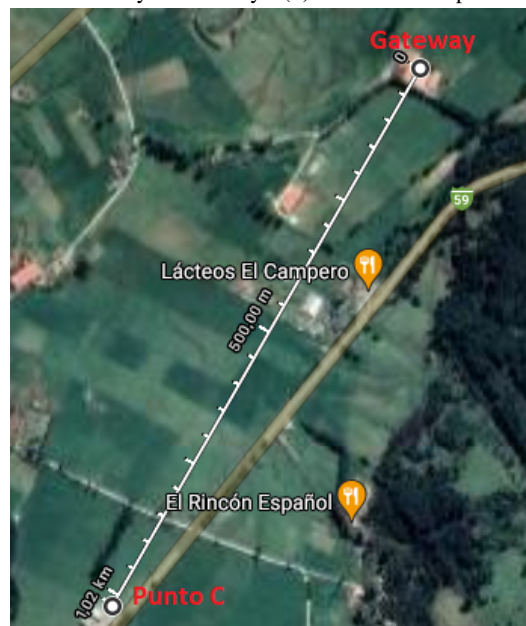
Tabla 5.1: Coordenadas del Gateway y puntos de referencia en donde se ubica el nodo.

Donde la constante 6378 es el radio de la tierra en kilómetros,  $X_t$  y  $Y_t$  son las coordenadas del nodo en sus distintos puntos y  $X_r$  y  $Y_r$  son las coordenadas del Gateway.

En las Figuras 5.3a, 5.3b y 5.3c se aprecia la ubicación del Gateway y el punto A, B y C, respectivamente, donde se encuentra el nodo. En los tres puntos se verificó la transmisión efectiva de datos mediante el envío de 100 paquetes en cada distancia, para analizar el porcentaje de pérdidas de paquetes (ver Figura 5.4).



(a) Ubicación del punto de referencia A y el Gateway (b) Ubicación del punto de referencia B y el Gateway.



(c) Ubicación del punto de referencia C y el Gateway..

Figura 5.3: Distancias del Gateway a los diferentes puntos del nodo

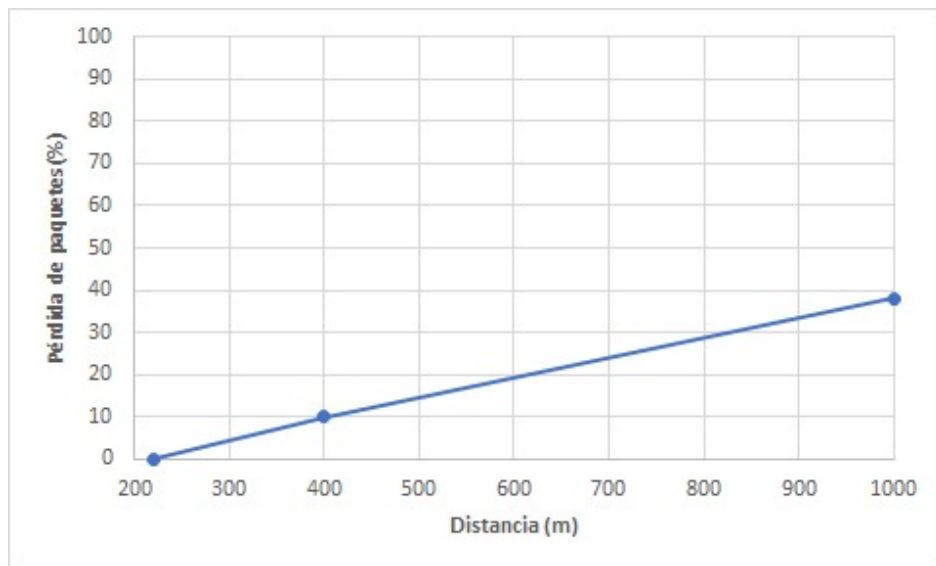


Figura 5.4: Pérdida de paquetes en función de la distancia

### 5.3. Análisis del comportamiento del animal

Para determinar el umbral de pasos que da una vaca en un periodo de una hora cuando está en proestro, se realizaron pruebas en la vaca con ID 585 (ver Figura 5.5). Se monitorizó el comportamiento de la vaca durante 19 días.



Figura 5.5: Vaca con ID 585

En la Figura 5.6 se muestra en azul el comportamiento de la vaca cuando no está en celo, es decir, cuando está en la etapa de diestro. Esta etapa duró 13 días desde que se iniciaron los experimentos. En naranja se



visualiza un aumento de comportamiento cuando entra al periodo de proestro previo al celo, que tuvo una duración de 5 días.

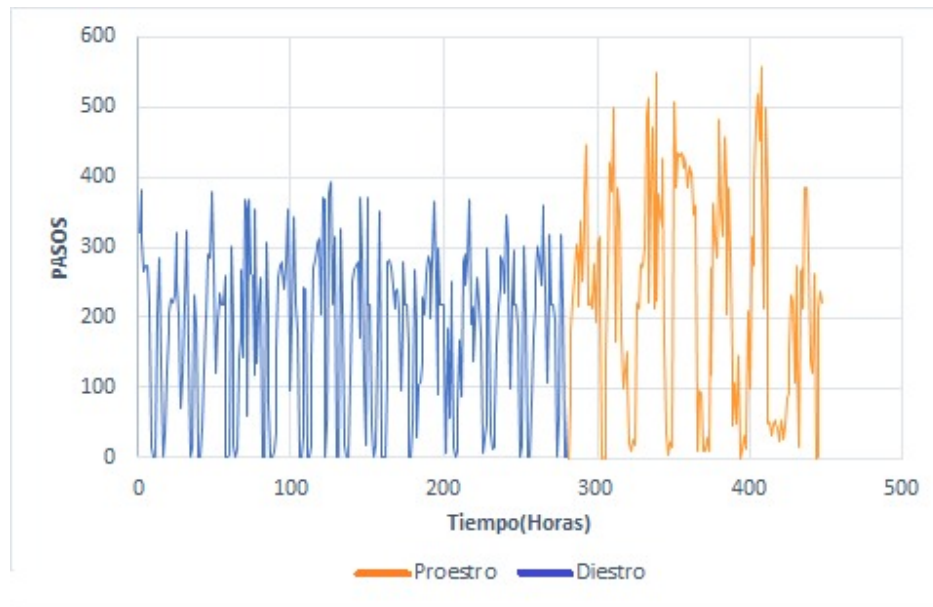


Figura 5.6: Actividad física del animal cuando se encuentra en Proestro vs Diestro

El valor promedio diario de pasos por hora de la vaca en la etapa de diestro es de 280 pasos. En el proestro su actividad aumenta, dando un promedio diario de pasos por hora de 400 pasos. Finalmente, en el periodo del estro disminuye drásticamente su actividad a un promedio de 30 pasos por hora. Este periodo comprende entre 4 y 8 horas, es aquí cuando la vaca debe ser inseminada. Debido a lo descrito anteriormente se determinó que el umbral de pasos por hora sea de 390 pasos.

Parte del comportamiento es que en la fase del estro el animal presenta una actividad conocida como el “reflejo de inmovilidad”, por lo que la vaca disminuye su actividad y se dispone a ser montada, en este periodo se detectaron 2 montas.

## 5.4. Detección del celo

Para detectar el celo se seleccionaron a 2 vacas que se encontraban en etapa de diestro. Estas fueron la vaca con ID 583 y la vaca con ID 592. Luego se procedió a inducirles el celo con hormonas. Desde el día en que se indujo el celo se monitoreó su comportamiento durante un periodo de 6 días.

En la Figura 5.7 se muestra el comportamiento de la vaca con ID 592 vs el comportamiento de la vaca ID 583 por un periodo de 6 días. Las detecciones fueron exitosas dado que su actividad física encajó dentro de los parámetros del algoritmo y además se monitoreó exitosamente 1 y 2 montas, respectivamente, en este periodo.

En la Figura 5.8 se aprecia a los animales con el ID 592 y 583, respectivamente, con sus chalecos y sus correspondientes nodos. Además en la Figura 5.9 se puede observar la respuesta del aplicativo móvil, la cual muestra los pasos dados y las montas detectadas para cada animal. Los valores del estado de la placa, como son la temperatura y la humedad, se almacenan en un archivo en la memoria externa para su posterior análisis.

Se debe aclarar que el comportamiento del ganado es un fenómeno social, por lo que el algoritmo no siempre



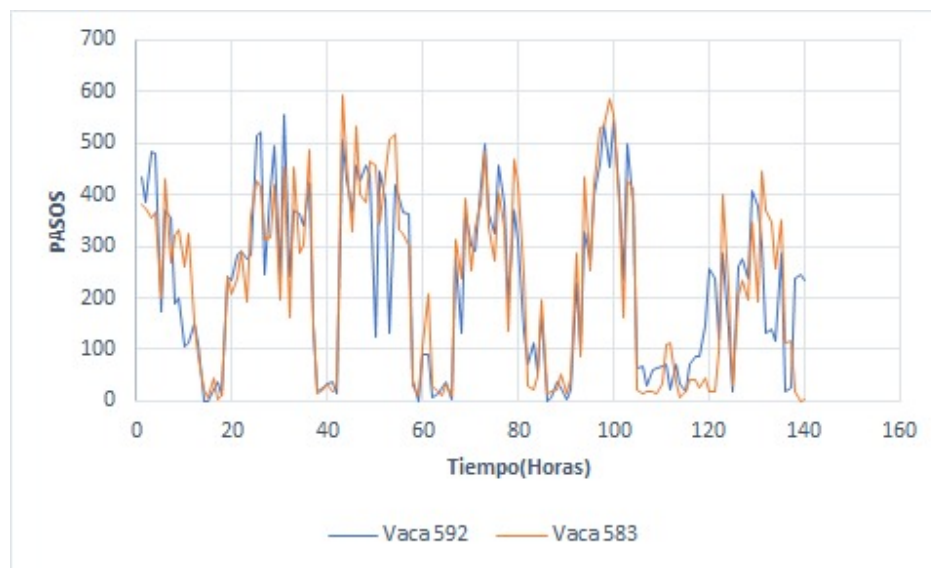


Figura 5.7: Actividad de las vaca 592 y 583



(a) Vaca con la ID 592



(b) Vaca con la ID 583

Figura 5.8: Vacas para la detección de celo



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
MONITOREO DEL CELO EN LA GRANJA IRQUIS

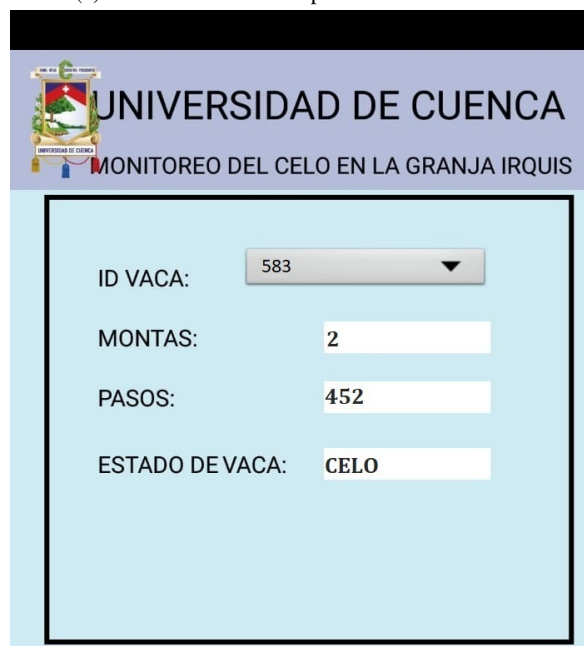
ID VACA: 592

MONTAS: 1

PASOS: 420

ESTADO DE VACA: CELO

(a) Alertar enviada a la aplicación móvil en 592



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
MONITOREO DEL CELO EN LA GRANJA IRQUIS

ID VACA: 583

MONTAS: 2

PASOS: 452

ESTADO DE VACA: CELO

(b) Alertar enviada a la aplicación móvil en 583

Figura 5.9: Alertas enviadas al aplicativo móvil

detectará el celo basada en la actividad, puesto que habrá vacas donde su comportamiento físico en el proestro será debido al fenómeno de “invisibilidad” donde no presentan síntomas de celo.



---

## Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se incluye las conclusiones finales del trabajo (Sección 6.1), las recomendaciones que se deben aplicar para el uso del dispositivo de detección de celo (Sección 6.2), y para el desarrollo trabajos futuros (Sección 6.3).

### 6.1. Conclusiones

Se utilizó el microcontrolador como elemento de inserción para el primer prototipo del dispositivo, esto con la finalidad de probar su funcionamiento. Una vez validado el mismo, se envió el diseño final para su construcción y soldado de los elementos de montaje superficial, todos estos de bajo consumo energético. El diseño final logró ser compacto y su tamaño reducido.

De la misma manera, se diseñó la placa para el transceptor LoRa para ser conectado de manera directa a la Raspberry pi 3 B+, logrando hacer el dispositivo más compacto al momento de su funcionamiento.

Basados en la comunicación entre un dispositivo y el Gateway con sus respectivas llaves, se procedió a incorporar al dispositivo final cada sensor necesario, teniendo en cuenta siempre los buses de comunicación y el tipo de dato que se transmite, dado que diferentes sensores se comunicaban por el mismo bus de datos. Se logró comunicar todos los sensores con el microcontrolador exitosamente, para luego codificar la trama mediante desplazamientos y transmitirla hacia el Gateway. En el Gateway se configuraron las llaves para cada dispositivo y se implementó un decodificador por desplazamientos para la trama receptada. Los datos están presentados en una interfaz de usuario intuitiva.

Una vez desarrollado el dispositivo definitivo se procedió a cargar el programa utilizando bootloader con el bus SPI, se probó en laboratorio los sensores y la comunicación de manera satisfactoria. Posteriormente se procedió a hacer las pruebas de alcance en la granja Irquis. Se instaló el Gateway en un poste de luz a una altura de 6 metros, este se comunicaba a un Modem para crear la red local dentro de la granja. Luego se colocó el dispositivo a distancias de 228m, 400 m, 1Km. El dispositivo transmitió paquetes a una distancia de 1 kilómetro con una frecuencia de 433 MHz, 12 como factor de ensanchamiento, ancho de banda de 125 KHz, tasa de codificación 4/5 y potencia de transmisión de 20 dB.

Para el análisis del consumo energético se utilizó el sensor de corriente INA219, por lo que se armó un circuito externo al nodo e hizo este análisis en laboratorio. La autonomía del nodo con una batería de litio de

1200 mA y 3.7 V fue de 24 horas. Se determinó que conforme la batería se va agotando el dispositivo consume más corriente.

Basado en el análisis del comportamiento de la vaca con ID 585, se estableció 390 pasos por hora como umbral para detectar el celo en función de su comportamiento físico. Se realizaron dos pruebas simultáneamente con las vacas con ID 592 y 583, donde se detectó el celo con éxito y dentro de los tiempos críticos. Es importante mencionar que la alerta se envió sin diferenciar si fue por el comportamiento o por las montas detectadas.

## 6.2. Recomendaciones

- Al momento de implementar el dispositivo en el lugar de estudio, se tiene que colocar el Gateway en un lugar estratégico para garantizar una comunicación estable. Esta recomendación es debido a que se pierden paquetes cuando no hay suficiente línea de vista.
- Se recomienda también realizar un estudio del comportamiento grupal del ganado y no solo individualmente. Esto es debido a que al pasar todo el tiempo en rebaño se vuelve un comportamiento social, y podría arrojar datos que sirvan para aumentar la eficiencia del dispositivo a la hora de la detección del celo.

## 6.3. Trabajos futuros

A continuación se explica como se puede mejorar el dispositivo **IoT** para la detección celo de ganado bovino o ampliado con futuros análisis

- Para todas las pruebas realizadas con el dispositivo se usó una potencia de transmisión de +20dBm. Como un trabajo futuro, se propone que la potencia sea adaptable, ya que al usar este valor elevado y continuamente el dispositivo puede disminuir la vida útil del dispositivo
- El consumo energético es una de los retos a mejorar para investigaciones futuras de este dispositivo, ya que el mismo funciona todo el tiempo. Para reducir el consumo se propone mejorar el algoritmo para crear interrupciones de funcionamiento en el nodo y de esta manera no permanezca en actividad siempre, así se vería reflejado una disminución en el consumo energético
- El dispositivo cuenta con pines tanto analógicos como digitales que no son utilizados; por lo que se propone el uso de estos pines para investigaciones futuras
- Se recomienda continuar mejorando el dispositivo para que no solo realice la detección de celo, sino también obtenga más información del animal como su estado de salud. Esta información adicional podría ayudar a detectar tempranamente ciertas enfermedades y ser tratadas oportunamente.



---

## Configuración y programación de dispositivos

En este apéndice, se presenta un resumen de la configuración y programación del dispositivo para la detección de celo en ganado bobino.

### A.1. Configuración del dispositivo

El microcontrolador usado en la placa debe contar con un gestor de arranque (*bootloader*). Este es un programa que permite programar a la placa mediante el puerto serie. En el arranque del programa, el *bootloader* verifica si se intenta programar, caso contrario el *bootloader* ejecuta el último programa grabado. Se puede cargar el *bootloader* con una placa de Arduino; esta funcionará como programador o generalmente conocido como *master* y al nodo que se va a programar se lo conoce como *slave*. La comunicación que se aplicará para estos dos dispositivos será *SPI*, y la comunicación entre el computador y el *master* será por puerto serie.

Primero se carga el Sketch *ArduinoISP*, el mismo que se encuentra en los ejemplos de Arduino, para que el *master* actúe como programador *SPI*. Para que Arduino reconozca al microcontrolador Atmega 1284, se debe ir a archivo, preferencias y escribir en el gestor de URLs lo siguiente: [https://mcudude.github.io/MightyCore/package\\_MCUdude\\_MightyCore\\_index.json](https://mcudude.github.io/MightyCore/package_MCUdude_MightyCore_index.json), como se indica en la Figura A.1.

A continuación, hay que ir a Herramientas, Placa, Gestor de tarjetas y buscar el paquete MightyCore y proceder a la instalación. Como se observa en la Figura A.2.

Este paquete contiene la tarjeta ATmega1284/P. Se desconecta el *master* del ordenador, y se conecta el *master* y *slave*. Se conectan los pines del bus *SPI*, el VCC y el GND entre ambas placas, como se indica en la Figura A.2

Una vez que se haya conectado correctamente, se selecciona la placa “ATmega1284”, clock “16 MHz external”, programador “Arduino as ISP (MightyCore)”. Como se observa en la Figura A.3.

Una vez realizado todos estos pasos correctamente, se selecciona Quemar Bootloader, y se apreciará un mensaje de confirmación que indica que se llevó con éxito el proceso.

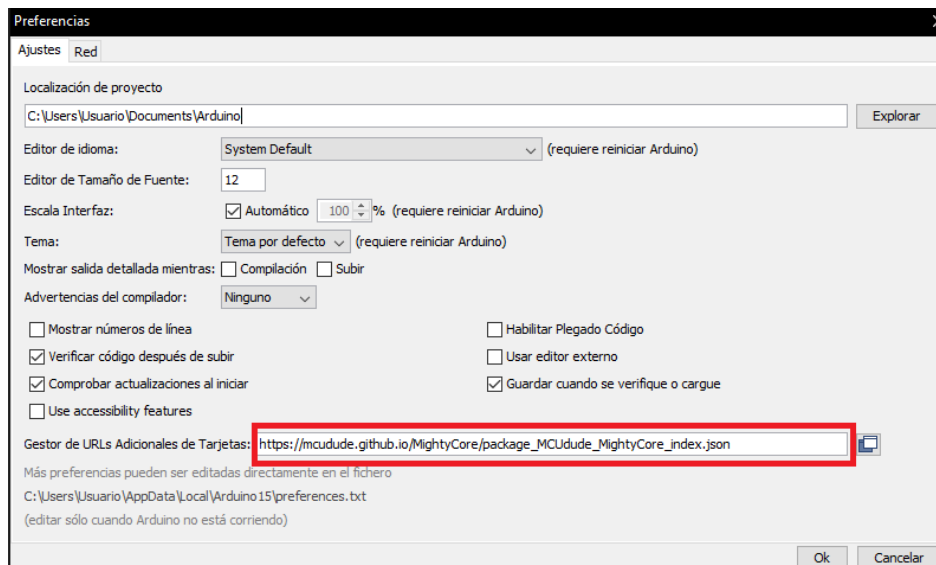


Figura A.1: Configuración para Gestor de URLs adicionales de tarjeta

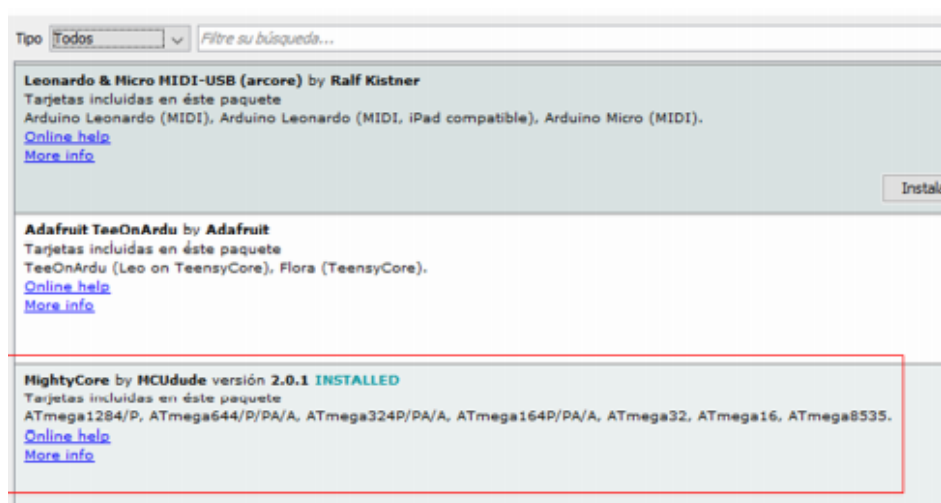


Figura A.2: Configuración para Gestor de URLs Adicionales de tarjeta

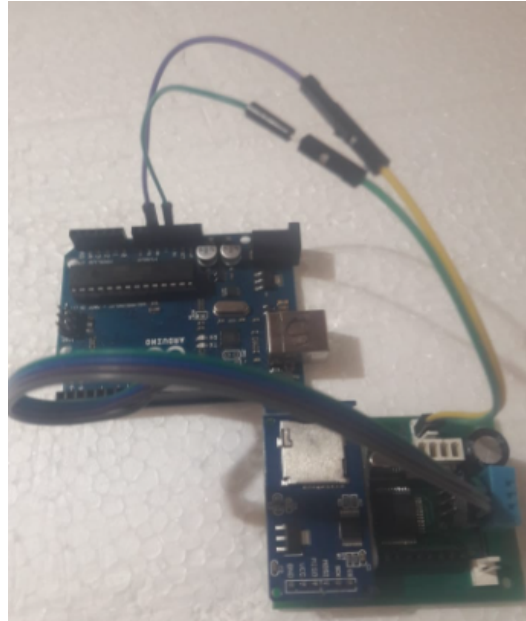


Figura A.3: Interconexión entre master y slave.

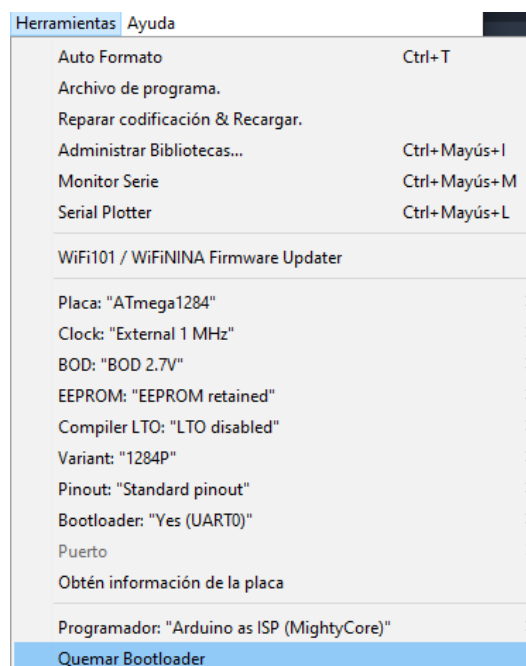


Figura A.4: Instalación de tarjetas de MightyCore







---

## Bibliografía

- [1] J. P. Sumba, “Inseminación artificial con celo natural en vacas productoras de leche con semen sin el proceso de descongelado en el cantón Paute,” *Univ. Politécnica Sales.*, p. 79, 2012.
- [2] N. G. Sepúlveda y E. Rodero, “Evaluation of Oestrus Detection in Dairy Farms,” *Rev. Cient.*, vol. XII, pp. 169–174, 2002.
- [3] J. León, J. Ramón, L. Ayala, J. Vázquez, R. Rodas, y J. Pesántez, “Comparación de dos métodos de detección de celo en vacas mestizas Charoláis en la Amazonía ecuatoriana,” *MASKANA, Producción Animal*, 2017.
- [4] R. L. De la Sota, “DETECCIÓN DE CELOS: COMO CALCULAR SU INTENSIDAD Y EXACTITUD,” *Sitio Argentino de Producción Animal*, 2017.
- [5] A. I. C. Arce, A. R. B. Tech, A. C. S. Silva, y E. J. X. Costa, “Monitorización de rebaños de bovinos a través de redes de sensores inalámbricos,” *Arch. Zootec.*, vol. 58, no. 222, pp. 253–2638, 2009.
- [6] U. Brehme, U. Stollberg, R. Holz, y T. Schleusener, “ALT pedometer-New sensor-aided measurement system for improvement in oestrus detection,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 62, no. 1, pp. 73–80, 2008.
- [7] A. Rippe y A. Christian, “El Ciclo Estral,” *Dairy Cattle Reprod. Conf.*, no. March 2015, p. 112, 2009.
- [8] F. Sebaste, J. Arribere, y N. Ajargo, “Sistema de detección de celo en ganado bobino,” p. 113, 2014.
- [9] D. Devi Kala Rathinam, D. Surendran, y A. Shilpa, “Modern Agriculture Using Wireless Sensor Network (WSN),” *5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS)*, 2019.
- [10] K. MekkiEddy y B. ChaxelFernand, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoTdeployment,” *Korean Institute of Communications and Information Sciences (KICS)*, 2018.
- [11] N. Naik, “LPWAN Technologies for IoT Systems: Choice Between Ultra Narrow Band and Spread Spectrum,” *IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, 2018.
- [12] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, y T. Watteyne, “Understanding the Limits of LoRaWAN,” *Understanding the Limits of LoRaWAN. IEEE Communications Magazine*, 55(9), 34–40., 2017.
- [13] L. Casals, B. Mir, R. Vidal, y C. Gomez, “Modeling the Energy Performance of LoRaWAN,” *Sensors*, 17(10), 2364., 2017.

- [14] “Lorawan protocol: specifications, security, and capabilities,” *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, 37–63, 2020.
- [15] I. O. Monfort, “Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red LoRaWAN y de los dispositivos LoRa,” *Universitat Oberta de Catalunya, CATALUNYA*, p. 11, 2017.
- [16] J. Kim y J. Song, “A Dual Key-Based Activation Scheme for Secure LoRaWAN,” *Wireless Communications and Mobile Computing* 1–12., 2017.
- [17] P. Modernell, “Plataforma de Pruebas de Conformidad LoRaWAN,” *Universidad de la República de Uruguay*, 2020.
- [18] A. Szekacs, T. Szakaill, y Z. Hegykozi, “Realising the SPI communication in a multiprocessor system.” *5th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*, 2007.
- [19] F. Leens, “An introduction to I2C and SPI protocols.” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 12(1), 8–13., 2009.
- [20] A. Gloria, F. Cercas, y N. Souto, “Comparison of communication protocols for low cost Internet of Things devices,” *South Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference*, 2017.
- [21] Y. Wang y K. Song, “A New Approach to Realize UART ,” *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, 2011.
- [22] L. A. F. N. Perdana R. H. Y, “WATER LEAK DETECTION AND SHUT-OFF SYSTEM ON WATER DISTRIBUTION PIPE NETWORK USING WIRELESS SENSOR NETWORK,” *International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA)*, 2019.
- [23] O. D y Y. K, “FUNDAMENTOS Y MÉTODOS ACTUALES DE DETECCIÓN DE CELO EN BOVINOS,” *Seminario de Profundización en Reproducción Bovina*, 2017.
- [24] D. CARRERA, “EFECTIVIDAD DE CUATRO MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN DE CELO EN VACUNO DE CARNE,” *Universidad de Zaragoza*, 2017.
- [25] R. A. M. Benavides, F. S. Aguilar, S. P. Duque, y H. S. Guerrero, “Caracterización del ambiente térmico para la actividad ganadera bovina en el Valle del Cauca,” *Colombia, Acta Agron.*, vol. 65, no. 4, 2016.
- [26] A. I. C. Arce, A. R. B. Tech, A. C. S. Silva, y E. J. X. Costa, “Monitorización de rebaños de bovinos a través de redes de sensores inalámbricos,” *Arch. Zootec.*, vol. 58, no. 222, pp. 253–263, 2009.
- [27] P. Carroza Valencia, “Comparación de dos métodos de detección de celo en vacas holstein americano de alta producción,” 2010.
- [28] F. Sebaste, J. Arribere, y N. Ajargo, “Sistema de detección de celo en ganado,” p. 113, 2014.
- [29] P. Cong, K. Nguyen, N. Dinh, T. Duc, H. Quang, y N. Van, “Classification of cow’s behaviors based on 3-DoF accelerations from cow’s movements,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol.9, No.3, June2019, pp. 1656 1662.
- [30] M. Schwager, D. M. Anderson, Z. Butler, y D. Rus, “Robust classification of animal tracking data. Computers and Electronics in Agriculture,” 56(1), 46–59., 2007.



- [31] Q. Trung, H. Phung, B. Trung, C. Thi, y D. Tran, “Cow Behavior Monitoring Using a Multidimensional Acceleration Sensor and Multiclass SVM,” *International Journal of Machine Learning and Networked Collaborative Engineering*, Vol. 02, No. 3 ,(2018), 110–118.
- [32] R. Shrestha, “Study and Control of DHT11 Using Atmega328P Microcontroller ,” *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2019.
- [33] R. R. G. Jorge, “Diseño y Construcción de un sensor de Fuerza y Torque de bajo costo para un Robot KUKA Youbot,” 2013.
- [34] M. Ertürk, M. Aydın, y M. Büyükakka, “A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies,” *Future Internet*, 2019.
- [35] “ Raspberry Pi single-channel packet forwarder. [En línea]. Disponible: [https://github.com/tftelkamp/single\\_chan\\_pkt\\_fw](https://github.com/tftelkamp/single_chan_pkt_fw).”
- [36] P. S, A. F, V. A, M. L, y G. J, “Rainfall Intensity Datalogger System. LoPy4-Based Design and Implementation,” 2019.
- [37] S. R. González, “ DISEÑO DE UN ESQUEMA CROSS-LAYER PARA EL BALANCE ENTRE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y CALIDAD DE SERVICIO EN LA TRANSMISIÓN DE TRÁFICO MULTIMEDIA EN REDES AD HOC,” *UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES*, 2017.
- [38] R. U.-R. P.452-10, “ Procedimiento de predicción para evaluar la interferencia en microondas entre estaciones situadas en la superficie de la tierra a frecuencias superiores a 0,7 GHz\*,” *ITU-R P.452-10*, 2001.